

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

### Hodnocení přesnosti počítačové simulace vstřikování plastů

### Assessment of accuracy of computer injection molding simulation

Ondřej Kocián

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. - *TU v Liberci*  
Konzultant diplomové práce: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

#### Rozsah práce a příloh:

Počet stran	60
Počet tabulek	6
Počet příloh	0
Počet obrázků	31

**Datum:** 25.5.2012

# **ZADÁNÍ**

# **A N O T A C E**

## **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI** **Fakulta strojní**

### **Katedra strojírenské technologie** **Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství  
Student: Ondřej Kocián  
Téma práce: Hodnocení přesnosti počítačové simulace vstřikování plastů  
Assessment of accuracy of computer injection molding simulation

Vedoucí DP: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D.- *TU v Liberci*  
Konzultant: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

#### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá problematikou počítačových simulací vstřikování plastů. Jejím úkolem je na zvoleném díle ověřit přesnost simulace provedené v simulačním softwaru CADMOULD, vytvořené na základě skutečných procesních parametrů.

Výsledek simulace je poté porovnán pomocí vhodné metody měření se skutečností.

#### **Abstract:**

The thesis deals with the computer simulations of injection molding. Its task is verifying the accuracy of simulation for the selected part performed in the simulation software Cadmould. The simulation is created with the real process parameters.

Then the result of simulation is compared with reality by using appropriate method of measurement.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....  
Ondřej Kocián  
5.května 99  
549 81 Meziměstí

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Alešovi Auspergerovi, Ph.D. za cenné rady při zpracování diplomové práce. Za odborné vedení, rady a náměty děkuji mému konzultantovi Ing. Luboši Běhálkovi. Za poskytnuté informace a data děkuji Ing. Pavlu Bláhovi a jeho kolegovi Ing. Liboru Kociánovi z firmy BRONAS s.r.o..

# Obsah:

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1. Vstřikování.....	10
2.1.1. Sled operací při vstřikování.....	11
2.1.2. Stručný popis vybraných speciálních technologií vstřikování.....	15
2.1.2.1. Vstřikování s podporou plynu – GIT.....	15
2.1.2.2. Vstřikování s podporou vody – WIT.....	16
2.1.2.3. Dvou a vícekomponentní vstřikování.....	16
2.1.2.4. Kompresní vstřikování – CIM.....	17
2.1.2.5. Nízkotlaké vstřikování.....	17
2.1.2.6. Vstřikování plastů s prášky PIM.....	17
2.1.2.7. Střídavé vstřikování MLFM.....	17
2.1.2.8. Reakční vstřikování RIM.....	18
2.2. Konstrukce forem pro zpracování termoplastů .....	18
2.2.1. Základní součásti a konstrukční uspořádání vstřikovacích forem ..	19
2.2.2. Vtokový systém .....	21
2.2.2.1. Studené vtokové systémy.....	21
2.2.2.2. Horké vtokové systémy.....	23
2.2.3. Konstrukční řešení temperačního systému vstřikovacích forem...	23
2.2.4. Vyhazovací systém.....	25
2.3. Způsoby měření a kontroly dílů vyrobených vstřikováním.....	26
2.3.1. Měření na souřadnicových měřicích strojích.....	26
2.3.1.1. Konstrukční uspořádání souřadnicového měřicího stroje.....	27
2.3.1.2. Shrnutí možností měření na souřadnicových měřicích strojích...	28
2.3.2. Snímání pomocí 3D scanneru.....	28
2.3.2.1. Konstrukční uspořádání 3D scanneru a způsob snímání.....	29
2.3.2.2. Shrnutí nasazení a možností měření na 3D scanneru.....	30
2.4. Simulace vstřikování.....	30
2.4.1. Nasazení simulace při návrhu formy.....	31
3. Praktická část.....	35
3.1. Cíl práce.....	35
3.2. Podklady pro simulaci.....	35
3.2.1. Zvolený díl.....	35

3.2.2. Materiály použité při výrobě dílu.....	36
3.2.3. Vstřikovací forma.....	36
3.2.4. Procesní podmínky.....	38
3.3. Simulační model a vlastní simulace.....	39
3.3.1. Model vtokového systému.....	39
3.3.2. Model temperačního systému.....	40
3.3.3. Zadané podmínky vstřikování.....	41
3.4. Měření.....	43
3.4.1. Měření pomocí 3D scanneru.....	43
3.4.2. Měření na souřadnicovém měřícím stroji.....	45
3.5. Získané výsledky.....	46
3.5.1. Získané výsledky pro materiál Ultramid B3WG10.....	46
3.5.1.1. Výsledky simulace.....	46
3.5.1.2. Výsledky 3D optického snímání.....	48
3.5.1.3. Výsledky dotekového měření na souřadnicovém měřícím stroji..	49
3.5.2. Získané výsledky pro materiál Akulon K224-HG6.....	49
3.5.2.1. Výsledky simulace.....	49
3.5.2.2. Výsledky 3D optického snímání.....	52
3.5.2.3. Výsledky dotekového měření na souřadnicovém měřícím stroji..	52
3.6. Vyhodnocení.....	53
3.6.1. Porovnání kontaktního a optického měření.....	53
3.6.2. Porovnání výsledků simulace s výsledky měření.....	54
3.6.2.1. Porovnání pro Ultramid B3WG10.....	55
3.6.2.2. Porovnání pro Akulon K224-HG6.....	56
4. Závěr.....	58
Použitá literatura.....	60

## Seznam použitých zkratk a symbolů

GIT		Gass Injection Tehnology
WIT		Water Injection Tehnology
CIM		Comperession Injection Molding
$p_i$	[MPa]	vnitřní tlak hmoty v dutině formy
$p_z$	[MPa]	zbytkový tlak
$p$	[MPa]	vstřikovací tlak
$s_K$	[mm]	pohyb šneku
$s_N$	[mm]	pohyb formy (nástroje)
$t_{celk}$	[s]	celkový čas jednoho cyklu
$t_v$	[s]	doba vstřikování
$t_d$	[s]	doba dotlaku
$t_{ch}$	[s]	doba chlazení
$t_{pl}$	[s]	doba plastikace nové dávky
$t_m$	[s]	doba práce manipulátoru (zakládání zálisků apod.)
$t_{s1}$	[s]	uzavření formy
$t_{s2}$	[s]	uzamčení formy
$t_{s3}$	[s]	otevření formy
PET		Polyethylen tereftalát
PIM		Powder Injection Molding
MLFM		Multiple Live Feed Molding
RIM		Reaction Injection Molding
3D		3 Dimensional
NC		Numeric Control
CAD		Computer Aided Design
PA		Polyamid



# 1. Úvod

Vzhledem ke stále rostoucím nárokům na užité a mechanické vlastnosti, na cenu dílů vyráběných z polymerních materiálů, jsou vyvíjeny a hojně nasazovány kompozitní materiály plněny rozličnými plnivý. Jedním z vyztužujících plniv jsou skelná vlákna. Velmi významně ovlivňují pevnost a tuhost materiálu, významně ale také ovlivňují zpracovatelské vlastnosti. Materiály plněné skelnými vlákny zaujímají širokou oblast využití nejen v automobilovém průmyslu. Pro náročné aplikace, kde je kladen důraz na velkou rozměrovou přesnost, jsou stále snižovány finanční náklady a zkracován čas na přípravu výroby, bylo za potřebí vytvořit podpůrné prostředky konstruktérům forem. Tímto prostředkem se v posledních letech staly simulační softwary, které díky velkému rozmachu výpočetní techniky zvládají v krátkých časech počítat i složité děje jako je tok taveniny polymerního materiálu, chladnutí a deformace nastávající při procesu vstřikování. Vytvořit však matematický model dokonale popisující chování taveniny polymeru plněného vyztužujícími vlákny je velmi obtížný úkol.

Tato diplomová práce se zabývá ověřením přesnosti simulace provedené v simulačním softwaru CADMOULD 3D – F na základě parametrů zjištěných ve vlastním procesu při výrobě dílů vyrobených z polymerních materiálů vyztužených skelnými vlákny, které jsou později se simulací porovnávány. V práci jsou popsány základy teorie vstřikování, vybrané speciální technologie, základy konstrukce forem pro vstřikování plastů, úvod do simulace vstřikování a moderní metody měření. V praktické části je popsáno vytvoření modelu procesu v simulačním softwaru, vlastní výsledky provedené simulace jsou pak konfrontovány se skutečností.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Vstřikování

Vstřikování je velmi rozšířený způsob zpracování plastů. Zpracovávají se jím téměř všechny termoplasty, některé reaktoplasty a kaučuky. Výrobky vzniklé vstřikováním jsou po odstranění vtokové soustavy zpravidla již ve finální podobě. Velkou variabilitu a možnosti takto vyráběných dílů umožňuje výroba kompozitních dílů například použitím kovových zálistků pro výztuž, elektrické vodiče a kontakty pro vytvoření elektrického vedení dílem, nebo například pouzder pro prodloužení životnosti v pohyblivém uložení dílu. Kompozitní díly jsou ale i v provedení s nekovovými materiály. Obrovské možnosti umožnilo také vícekomponentní vstřikování, kdy je k výrobě dílu použito několik druhů plastů, které jsou vstřikovány ve sledu a umožní vytvoření dílů například s těsnicí vrstvou, vzhledově zajímavých dílů, nebo vede k úspoře drahých konstrukčních polymerních materiálů. Touto technologií je možné dosahovat velmi složitých tvarů a často převést v realitu moderní odvážný design. Vstřikované výrobky z plastů mohou dosahovat velmi dobrých mechanických a chemických vlastností, proto také nahradily dříve kovové obráběné nebo tlakově odlévané díly, díly z barevných kovů, kluzné materiály atd.. Vzhledem k vysoké produktivitě práce, snížení spotřeby práce člověka, výrazným finančním úsporám a snadné dosažení velkých sérií, se vstřikování stalo velmi významnou technologií a promítlo se do života populace celého světa.

Roztavený polymerní materiál je za vysokého tlaku vstříknut do tvarové dutiny vstřikovacího nástroje - formy. Kovová forma má za úkol jednak určit tvar výrobku, ale také zajistit správný způsob a rychlost ochlazení k dosažení správných vlastností výrobku. Roztavený polymerní materiál je do formy přiveden vtokovým systémem, který má zajistit optimální naplnění dutiny formy. Po zchladnutí na určitou teplotu je výrobek z dutiny formy po jejím rozevření odstraněn.

Vstřikování vyniká velkou variabilitou a rozmanitostí jednotlivých technologií. Použitím speciálních technologií jako GIT, WIT, CIM, tandemového, sendvičového, reaktivního vstřikování je možné docílit vlastností, úspor i vlastní

vyrobitelnost, které by běžným vstřikováním nebylo možné dosáhnout. Celý proces lze, pokud je to vhodné, plně automatizovat a dosáhnout tím další úsporu nákladů a lidské práce.

Technologie vstřikování se nasazují ve velkosériové a hromadné výrobě. Výjimku tvoří reaktivní vstřikování, které je nasazováno v malosériové výrobě. Důvodem jsou velmi vysoké finanční náklady na vstřikovací stroj, ale také na nástroj – formu.

### **2.1.1. Sled operací při vstřikování**

Vstřikování je cyklický způsob výroby. Vstřikovací cyklus je sledem jasně definovaných úkonů. Jedná se o tepelný cyklus materiálu, při němž je materiál ve formě tuhých granulí roztaven, poté zformován do požadovaného tvaru a zchlazen. Výsledkem je výlisek v tuhém stavu.

Granule jsou dodávány do násypky plastikační jednotky, odkud jsou dodávány nejčastěji šnekem, případně pístem, do tavicí komory. Teplo potřebné k tavení granulí je získáváno jednak vlastním vytápěním komory, dále třením o stěny komory a šneku a pak vlastním třením v médiu. V okamžiku kdy je naplastikována potřebná dávka taveniny, forma je uzavřena, uzamčena a dojde k vlastnímu vstřikování. Potřebná dávka je větší o rezervu potřebnou pro doplnění při chladnutí a smršťování. K němu dochází při fázi dotlaku. Poté dochází k dochlazení. V této fázi začíná plastikace nové dávky. Po dostatečném dochlazení dojde k otevření formy a vyjmutí/vyhození výstřiku. V této fázi je již nová dávka naplastikována. Cyklus se opakuje. Z popisu je patrné že některé úkony probíhají současně, takže dochází k úspoře času.

Granule příslušného polymeru projdou úpravou v podobě např. barvení a vysoušení. Jsou dokonale promíchány a dodány do násypky plastikační jednotky. Z plastikační jednotky jsou unášeny pracovní částí jednotky, kterou nejčastěji tvoří šnek. Používají se i pístové jednotky, jejich použití není tak časté. Otáčející se šnek ustupuje vzad, nabírá granule a přesouvá je směrem k tavicí komoře. Ta je vytápěna.

Teplo k tavení je z jedné třetiny přijímáno právě z topení tavící komory, zbytek tepla je získáván třením o stěny komory, šneku a vnitřním třením hmoty. Před ústím jednotky je síto a lamač. Lamač slouží k odstranění případných nedokonale naplastikovaných částí tzv. strun. Pomocí lamače jsou redukovány a dotaveny okolní hmotou. Takto naplastikovaná dávka je připravena k vstříknutí do dutiny formy. Dávka je větší o tzv. polštář, nutný při fázi dotlaku a chlazení. Polštář nesmí být moc velký, aby nedošlo k degradaci hmoty.

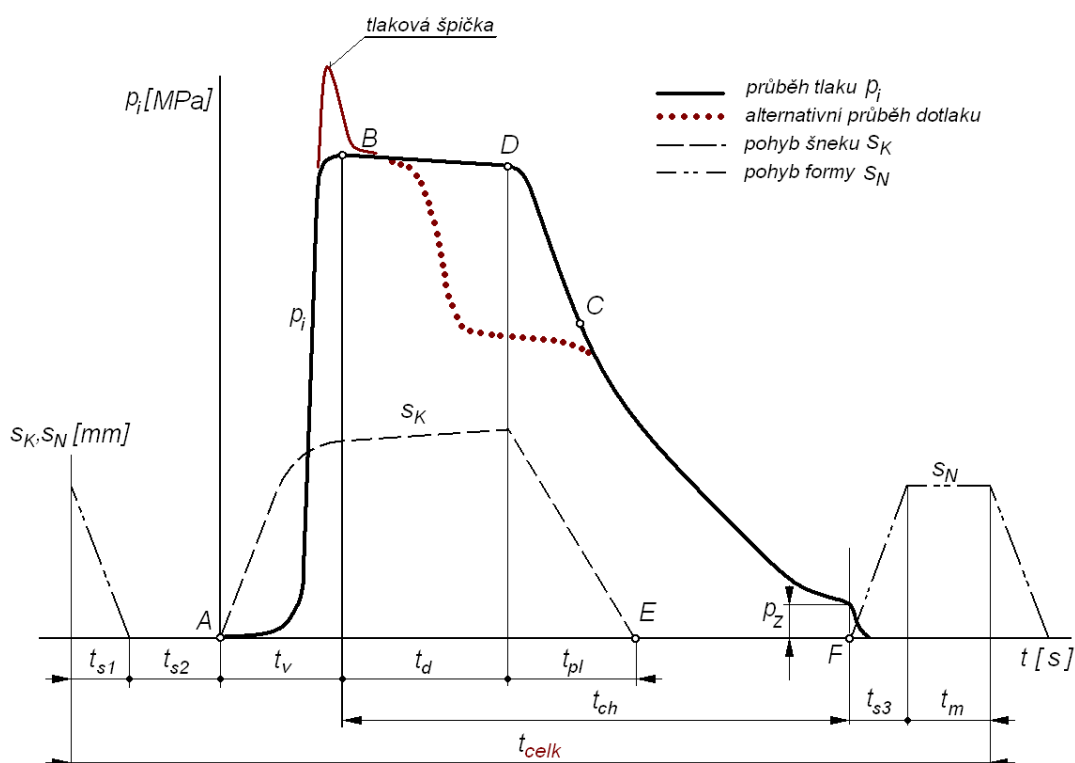
V okamžiku, kdy je dávka naplastikována, dojde k uzavření formy. V případě záliskování předchází uzavření formy zakládání zálisků. To je buď ruční, poloautomatické, nebo automatické. Forma je uzavřena poměrně malou přisouvací silou. Jakmile je uzavřena, dojde k jejímu uzamknutí. K němu dojde za působení několikanásobně větší síly. Parametr který jí určuje je tzv. uzavírací tlak. Ten musí být dostatečně velký, aby při vstřikování nedošlo k otevření ( dýchnutí ) formy a nevznikly nežádoucí přetoky.

Po uzavření a uzamčení formy dojde k vlastnímu vstřikování. Vstřikovací jednotka otevře ústí a šnek se začne pohybovat směrem vpřed. Počne vstřikování vysokou rychlostí. Jakmile dojde k naplnění dutiny formy dojde k náhlému zvýšení tlaku. Tento okamžik je kritický a právě v něm může dojít k „dýchnutí“ formy. Tímto okamžikem také fáze vstřikování končí.

Fáze dotlaku má jednu z klíčových úloh na finální vlastnosti výstřiku. Tuhnutím dochází ke smršťování. Ke kompenzaci slouží doplňování hmoty z polštáře, který se ještě nachází před čelem šneku. Dotlak může být po celou dobu konstantní nebo proměnlivý. Změna může být skoková nebo plynulá. Záleží to na možnostech vstřikovacího stroje. Jakmile přestane čelo šneku dotláčet, výstřik dále chladne bez působení tlaku.

Při chlazení dojde k odvodu zbylého tepla, aby bylo možné výstřik bez poškození vyjmout z formy. Během chlazení dochází k plastikaci nové dávky plastu pro další cyklus.

Jakmile je výlisek dostatečně ochlazen, dojde k otevření formy. Vzhledem ke konstrukci forem je zpravidla otevření formy spřaženo s pohybem vyhazovačů. Tento okamžik se dá označit jako konec cyklu.



Obr.1: Průběh vnitřního tlaku  $p_i$  v dutině formy během procesu vstřikování

$s_K$  – pohyb šneku,  $s_N$  – pohyb formy (nástroje),  $t_{celk}$  – celkový čas jednoho cyklu,  $t_v$  – doba vstřikování,  $t_d$  – doba dotlaku,  $t_{ch}$  – doba chlazení,  $t_{pl}$  – doba plastikace nové dávky,  $t_m$  – doba práce manipulátoru (zakládání zálisků apod.),  $t_{s1}$  – uzavření formy,  $t_{s2}$  – uzamčení formy,  $t_s$  – otevření formy,  $p_z$  – zbytkový tlak

Klíčové úseky, které zásadně ovlivní vlastnosti výstřiku jsou plnění a chlazení. K plnění dochází ve stavu, kdy je plast nad teplotou tání (semikrystalický polymer) nebo nad teplotou viskózního toku (amorfní polymer). Okamžitě po vstupu taveniny do dutiny formy nebo už v samotném vtokovém systému u studeného rozvodu dochází při kontaktu se stěnou nástroje k poklesu tlaku a teploty v tavenině, což způsobuje vzrůst viskozity, dochází k působení smykových napětí a orientaci makromolekul. Po vlastním plnění nastává chlazení, jehož první fází je dotlak.

Dotlak může být buď izobarický nebo izochorický. Je třeba, aby bylo přepnuto na dotlak ve správnou chvíli. Pozdní i předčasné přepnutí je nežádoucí. Určení okamžiku, kdy je přepnuto na dotlak, se děje buď za pomoci tlakových senzorů, nebo se musí navzorkovat. To se děje postupným plněním formy a otevíráním až se dosáhne zaplnění asi 97% dutiny formy. Po skončení působení

dotlaku pokračuje chlazení. To je u konce ve chvíli, kdy je střední teplota ve výstřiku menší, než teplota tvarové stálosti. Teplota povrchu výstřiku je shodná s teplotou stěn formy. Naproti tomu je v jádru výstřiku hmota daleko teplejší. Při vyhození dojde k vyrovnání právě na střední teplotu. Pokud je tato teplota vyšší než teplota tvarové stálosti, dojde zpravidla ke změnám tvaru a vyrobení neshodného dílu. Teplotou formy se dá doba chlazení ovlivnit – zkrátit nebo prodloužit. Má to vždy ale vliv na strukturu, potažmo na vlastnosti dílu.

Během doby chlazení probíhá u semikrystalických polymerů krystalizace části objemu hmoty. Podíl krystalické a amorfní fáze je dán stupněm krystalinity. Ta je ovlivněna jednak typem polymeru a zpracováním, dá se ale ovlivnit i přidáním nukleačních činidel. Krystalizace má tři fáze. Nukleace, růst a dokončení krystalizace. K nukleaci dochází ve fázi dotlaku. Nukleační činidlo ovlivní výrazným způsobem počet zárodků krystalů a tím zkrátí dobu růstu. To lze využít pro zkrácení cyklu tím, že lze snížit teplotu formy a tím dosáhnout kratší doby chlazení, ale stále ještě dosáhnout vysoký podíl krystalické fáze. Naproti tomu se někdy využívá rychlého zchlazení a tím potlačení vzniku krystalické fáze. Je to například u lahví vyráběných z PET nebo pro dosažení vysokého lesku povrchu vzhledových součástí. U konstrukčních součástí jako jsou ozubená kola, pouzdra, páky apod. je naproti tomu nutné dosažení co největšího stupně krystalinity k dosažení co nejlepších mechanických vlastností. Mimo formu následně může dojít ještě k nežádoucímu jevu a tím je dokrystalizace. Ta má za následek změnu vlastností, rozměrů – dodatečné nežádoucí smrštění. Smrštění je následným jevem, který ke vstřikování patří. Má složku výrobní, se kterou je počítáno při konstrukci formy. Může ale dojít právě ke zmíněnému dodatečnému smrštění, které způsobí další změnu rozměrů, se kterou nebylo počítáno a tím může dojít k výrobě neshodných dílů. Smrštění se zpravidla neprojevuje rovnoměrně, ale dle tvaru výstřiku, odvodu tepla a případně použití plastu s výztuží vlákny v různých směrech různě. Při podélné orientaci vláken je smrštění v příčném směru větší. V materiálu se také během chlazení objevuje vnitřní pnutí. To je způsobeno orientací makromolekul již při plnění a dále vlivem krystalizace a prostým chladnutím. Pnutí také vzniká mezi taveninou a zamrzlou vrstvou a při předčasném vyhození nedochlazeného výstřiku může dojít k pnutí expanznímu. [1]

Všechny tyto průvodní a následné jevy se projevují ve vlastnostech a chování výrobků z plastů a je nutno s nimi počítat jak při návrhu formy tak při vlastním výrobním cyklu.

Parametry jako vstřikovací tlak, dotlak (velikost a doba dotlaku), teplota taveniny, teplota formy, teplota doformování, tyto jevy ovlivňují a ovlivňují se také navzájem. Proto je nastavení optimálních parametrů někdy obtížné. Navíc je z ekonomického hlediska nutno snižovat spotřebu času a energií. Stává se proto, že ekonomický zájem jde proti technologickému a často ohrožuje kvalitu a vlastnosti dílu.

### **2.1.2. Stručný popis vybraných speciálních technologií vstřikování.**

Jak již bylo zmíněno výše, pro zvýšení variability, dosažení vlastností u výrobků, které by byly u běžného vstřikování nedosažitelné, bylo vstřikování doplněno, případně modifikováno na několik speciálních technologií.

#### **2.1.2.1. Vstřikování s podporou plynu – GIT**

Je to technologie, která umožňuje výrobu dutých dílů, dílů uzavřených s jádrem tvořeným plynovou dutinou. Je možné tak vyrábět výstřiky s velkým průřezem, které by jednak při chlazení vyžadovaly velký odvod tepla, ale docházelo by k vzniku velkých povrchových vad – propadlin a staženin, které nejsou žádoucí. Navíc dojde k úspoře materiálu a vlastní hmotnosti dílu. Takto vyrobené díly mají také dobrou tuhost. V procesu dojde ke snížení spotřeby času a energie, jednak zkrácením doby chlazení, potažmo celého cyklu a není třeba tak vysokých uzavíracích sil, protože tlak plynu nedosahuje vstřikovacího tlaku. Pro vytvoření dutin se používá dusík velké čistoty, který je přiváděn injektorem nebo tryskou a v procesu má mimo vytvoření dutiny funkci dotlaku. Je potřeba správné načasování a řízení vstřiku a dále je nutné vhodně umístit vstup plynu k dosažení požadovaného efektu.

Dutinu lze vytvořit jednak technologií dlouhého vstřiku, kdy je taveninou vyplněna celá dutina formy a přivedený plyn pak část taveny vytlačí a to buď zpět před čelo šneku nebo do pomocné dutiny. Při nasazení technologie krátkého vstřiku

je do dutiny formy přivedeno pouze určité množství taveniny a vyplnění dutiny je zajištěno až za působení plynu. Je však nutné zvolit optimální množství taveniny a oproti technologii s dlouhým vstřikem není tak rovnoměrná tloušťka stěny.[1]

#### **2.1.2.2. Vstřikování s podporou vody – WIT**

Obdoba technologie vstřikování s plynem, ale místo plynu je do taveniny přiváděna voda. Voda díky svým vlastnostem zajišťuje kvalitnější povrch dutiny, usnadňuje plnění vzhledem ke vzniku zatuhlé vrstvičky v místě styku s kapalinou. Je nutné ale zajistit, aby v procesu nedošlo k varu vody a tím k nepříznivému působení páry. Navíc je tu nebezpečí hydrolýzy. Celý proces je pak zkomplikovaný odvodem vody z dutiny. Ten se realizuje buď mimo formu po vyjmutí vylitím vody do sběrné nádoby, nebo je možnost ještě v nástroji vodu vytlačit plynem nebo odsát. Tepelné vlastnosti vody mají za následek zkrácení chlazení. [1]

#### **2.1.2.3. Dvou a vícekomponentní vstřikování**

Dříve byla tato technologie používána hlavně pro vstřikování dvou stejnorodých plastů různé barvy a vytvoření dílů s kombinací barev, kde odpadl například následný potisk a zvýšila se odolnost proti otěru. Dnes je této technologii využíváno při vstřikování dvou a více druhů plastů často naprosto nesterodných a nesoudržných. Často to slouží k nahrazení obtížných montážních spojů nebo úspoře velmi drahých materiálů. Velmi hojně se toho užívá například v palivové technice, kde je na těsnící plochy nastříknuto těsnění, které by muselo být lepeno nebo jinak uchyceno nebo například úspora nákladného chemicky odolného materiálu, kdy je z tohoto materiálu vytvořen vnitřek nádoby a ten je po té z venkovní strany obstříknut levnější hmotou. Vzniká buď tvarové nebo adhezní spojení, nebo mohou být součástí i pohyblivé. Technologie je v podstatě shodná se základní technologií vstřikování. Je pouze potřeba stroj s více vstřikovacími jednotkami a k tomu uzpůsobený nástroj s více dutinami a vyřešeným překládáním do dalších dutin. To bývá řešeno rotací jedné poloviny formy, nebo její části. Pomocí pohyblivé části jádra – šoupátka odpadá nutnost více dutin.



#### **2.1.2.4. Kompresní vstřikování – CIM**

Je to technologie, která slouží k dosažení vysoké přesnosti rozměrů, minimalizuje smrštění, což je velmi často využíváno u optických dílů, také minimalizuje vnitřní pnutí, protože je tlakem najednou působeno na celý objem hmoty a tím se tato pnutí vyrovnají. Realizováno je to tak, že forma je při vstřikování částečně pootevřená a až následně dojde k stlačení pomocí dovření ovládanou uzavírací jednotkou.

#### **2.1.2.5. Nízkotlaké vstřikování**

Tato technologie užívá nízkého tlaku a to jak vstřikovacího tak uzavíracího tlaku uzavírací jednotky. Vstřikovací tlak má hodnotu asi 50% běžné hodnoty a zcela odpadá dotlak. Ve výrobku se sice dosáhne malého vnitřního pnutí, ale je zatížen množstvím vad – hlavně propadlinami a staženinami. Slouží k levné výrobě dílů s nižší kvalitou. Použití je na strojích s více nástroji - karuseli. Šnek vstřikovací jednotky se stále otáčí a nekoná dopředný pohyb – extruze.

#### **2.1.2.6. Vstřikování plastů s prášky – PIM**

Vstřikování je zde pouze jako pomocná fáze ve výrobě spékanych dílů s použitím kovových nebo keramických prášků. Takový prášek – plnivo je promíchán s plastem, který má funkci pojiva a následně je vstříknut za vysoké teploty a tlaku do formy. Dále už pokračuje zpracování v podobě spékacích procesů a s technologií vstřikování již nesouvisí. Polymerní pojivo je odstraněno vypálením v peci.

#### **2.1.2.7. Střídavé vstřikování – MLFM**

Jedná se o speciální technologii sloužící k dosažení vysoké kvality a zlepšení vlastností u dílů, pro náročné aplikace. Mezi vstřikovací jednotku a formu je umístěno speciální zařízení, které rozdvojuje kanál pro přívod taveniny do formy.

Každý kanál obsahuje ovládaný píst, který jednak ovládá přívod taveniny daným kanálem a navíc je schopen svým čelem po uzavření kanálu vyvozovat tlak. Dutina formy je tedy plněna dvěma kanály v ovládaných sekvencích. Zatímco jedním kanálem proudí tavenina, druhý dotlačí a naopak. Dosáhne se tak značného zhomogenizování, díky kterému se předejde tvoření vad, zlepší se mechanické vlastnosti a potlačí vnitřní pnutí. U plněných materiálů dojde k homogennímu naorientování vláken. Po skončení fáze plnění jsou oba písty v režimu dotkaku.

#### **2.1.2.8. Reakční vstřikování RIM**

Je zcela odlišnou technologií v několika aspektech. Zatímco u běžných metod je zpracováván materiál již po polymeraci. U reakčního vstřikování je na vstupu kapalným monomer. Viskozita monomerní kapaliny je o několik řádů menší než u taveniny polymeru, což má za následek, malý plnicí tlak. Teplota kapalné směsi je okolo 50 [°C] a stykem se stěnou formy nedochází k poklesu viskozity. K polymeraci materiálu dochází až ve formě za uvolnění určitého tepla. Forma není namáhána vysokými tlaky, jako je tomu u běžného vstřikování a je jednodušší a finančně daleko méně nákladná. Má ale vysoké nároky na těsnost vzhledem k malé viskozitě vstupní kapalné směsi. Vyrobený díl je vzhledem k tomu, že polymerace proběhla až ve formě, bez vnitřních pnutí, deformací, staženin a propadů. Technologie se hodí pro výrobu velkých dílů menších sérií. Běžně třeba pro kapoty a panelové díly zemědělských strojů nebo exkluzivní spoilery osobních automobilů v malých sériích.

Na výše uvedených příkladech byla ukázána vysoká variabilita a modifikovatelnost technologií vstřikování, pomocí kterých je možné řešit stále obtížnější aplikace a nahrazovat mnohdy kovové materiály dříve nenahraditelné.

## **2.2. Konstrukce forem pro zpracování termoplastů**

Nástrojem pro výrobu dílů vstřikování je vstřikovací forma. Vstřikovací forma je ucelený konstrukční celek, obsahující prvky pro připojení na vstřikovací stroj. Jsou

to středící kruhy pro přesné ustředění a dále otvory nebo vybrání pro upínky. Jedním ze středících kruhů vede přívod plastu do dutiny formy. Dále obsahuje přípojky na chladicí kapalinu, senzory, vytápění a u některých forem dále přípojky na stlačený vzduch a přívod kapaliny do hydraulického systému.

Formy jsou kovové. Převážná část forem je ocelových, jen pro zkušební účely nebo formy na malé série se používají například slitiny hliníku. Pro tvarové dutiny a vybrané součásti se používají oceli nástrojové. Zbytek je z ocelí konstrukčních. Ve formách se objevují ale i slitiny mědi nebo speciální slitiny.

Složitost forem je odvislá od tvaru a složitosti dílu, násobnosti a požadavků na kvalitu a vlastnosti dílu. Jedná se o velmi složitý a nákladný celek, jehož konstrukce a vlastní realizace je velmi pracná a je nutné zvolit hned na počátku správné řešení na kterém se případně dodělá minimum konstrukčních úprav. Fatální chyba na zrealizované formě má za následek obrovské finanční ztráty a prodloužení okamžiku startu výroby.

### **2.2.1. Základní součásti a konstrukční uspořádání vstřikovacích forem**

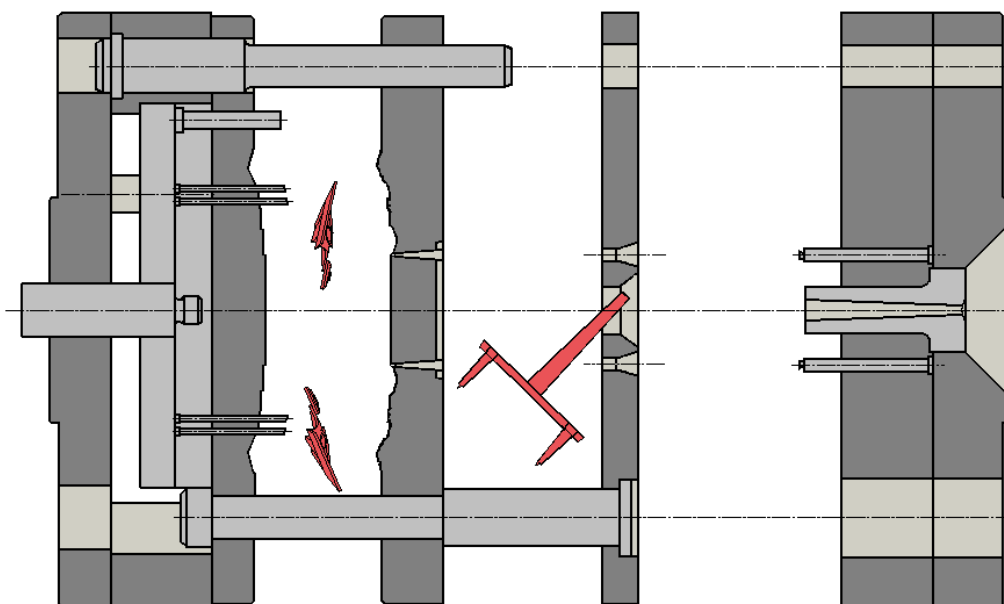
Základní struktura formy je popsána od nitra formy – tvarové dutiny směrem k povrchu.

Nejdůležitějším prvkem formy je tvarová dutina. Ta je v nejjednodušším případě vytvořená tvárníkem a tvárnici. Tvárník je zpravidla na pohyblivé straně formy, tvárnice na pevné straně formy, která obsahuje také vtokový systém. Ve většině případů již dvoudílné dělení s jednoduchou dělicí rovinou nestačí a dutina se musí rozdělit podle složité dělicí plochy nebo několika ploch. Dutinu tvoří nejen tvárník a tvárnice ale také čelisti. Jejich počet je dán složitostí tvaru dílu. Pokud je jednoduše nezaformovatelná pouze malá část dílu např. otvor, nebo část tvaru, používá se pohyblivé jádro. Ovládání čelistí nebo jader je zpravidla mechanické, může být ale ovládáno pneumaticky nebo hydraulicky. Forma obsahující čelisti se nazývá čelist'ová. Pokud díl obsahuje na tvarové ploše vnitřní závit je třeba pro odstranění dílu z formy tvárník nebo tvárnici koncipovat jako otočný díl ovládaný např. převodovkou. Takto řešená forma se nazývá vytáčecí.

Tvárník a tvárnice jsou ukotveny v kotevních deskách. Kotevní desky zpravidla obsahují temperační systém, průchod pro vyhazovače, na pevné straně je v desce umístěna část vtokového systému. U čelist'ových nástrojů je v kotevní desce také vedení čelistí a ovládání jejich pohybu. Na pohyblivé straně formy, pokud je

konstrukce formy uzpůsobená tak, aby díl zůstal na pohyblivé desce, je za kotevní deskou vytvořen prostor pro vyhazovací desku. Běžně je vyhazovací deska osazena vyhazovacími kolíky, vracecím kolíkem či kolíky a vyhazovacím čepem, který se po rozevření opře o doraz stroje a zajišťuje vysunutí vyhazovacích kolíků. Pokud jsou vyhazovací kolíky velmi štíhlé, musí mít vyhazovací deska zvláštní vedení. Povrchově formu uzavírají upínací desky. Ty jsou uzpůsobeny pro upnutí formy na stroj. Forma jako celek je vybavena vedením pomocí vodících sloupků a pouzder. Velmi často se používají 3 shodné a jeden s menším průměrem, který zajistí, že nedojde ke špatné montáži a případné destrukci nástroje. Spojování součástí je zpravidla pomocí šroubů a kolíků. Některé díly jsou svrtávány a skolíkované. V současnosti jsou formy vybavovány čidly nejčastěji teplotními a tlakovými. V některých případech například u forem se zálisky je kontrolována poloha nebo přítomnost cizího tělesa v prostoru rozevřené formy optickými čidly. Takto velmi zjednodušeně vypadá struktura dvoudeskového nástroje pro běžné vstřikování.

Nástroj třídeskový má dvě otevíratelné dělící roviny. Jednu pro díl a druhou pro vtokový systém. Řešení pro studený vtokový systém vyžaduje automatické



*Obr.2: Schéma otevřeného třídeskového nástroje s ovládanou třetí deskou*

otevření pomocné dělící roviny při každém zdvihu zároveň s vyhozením vtokového zbytku. Při použití masivního živého vtoku je pomocná dělící rovina otevíratelná pouze manuálně nejčastěji po skončení směny nebo v případě ztuhnutí vtokových

kanálů.

Formy lze také dále rozdělit podle násobnosti na jednonásobné a vícenásobné. Vícenásobný nástroj má více dutin a vtokový rozvod větven k jednotlivým dutinám. Při požadavcích na stejné vlastnosti dílů je nutno rozvodné kanály k jednotlivým dutinám korigovat k zajištění soudobého plnění všech dutin najednou. Pokud je vícenásobný nástroj nasazen na komplikovanější díl s nutností konstrukce pohyblivých jader nebo vytáček, projeví se to ve složitosti ovládání.

U speciálních technologií se pak ve formách objevují další konstrukční prvky, ať již mechanické např. převodovky s pohony nebo pneumatické a hydraulické pohybové jednotky ať již lineární nebo rotační. Těchto prvků je využíváno například u forem s rotací desek. Příkladem takových aplikací je dvoukomponentní vstřikování, kde se vyskytují celé rotující desky (podle horizontální i vertikální osy), indexové desky, nebo šoupátka. Způsob jejich ovládání je pak již na požadavcích odvislý od strojní výbavy a příslušenství pracoviště, na kterém bude nástroj pracovat.

### **2.2.2. Vtokový systém**

Vtoková soustava přivádí taveninu plastu ze vstřikovací jednotky do dutiny formy. Její provedení odpovídá velikosti dílu, násobnosti formy, druhu plastu, požadovaným vlastnostem dílu, stopě, která v místě vtoku může na dílu zůstat. Konstrukce musí zajistit dostatečný přísun plastu při minimálních rozměrech vtokové soustavy k eliminaci množství odpadového materiálu. Vtokový systém by měl jít také snadno odstranit z dutiny formy a bez poškození dílu jít oddělit.

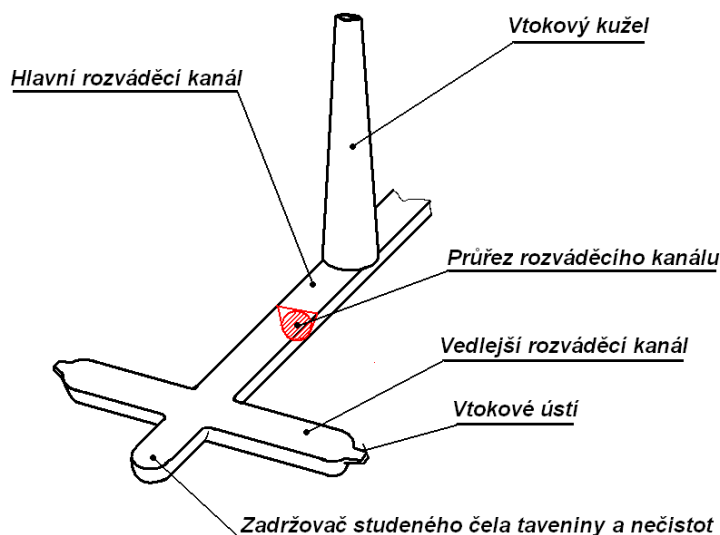
Konstrukce vtokových soustav se dají rozdělit podle násobnosti forem na vtokové soustavy forem jednonásobných a vícenásobných. Dále podle teploty na studené a tzv. horké vtokové systémy.

#### **2.2.2.1. Studené vtokové systémy**

Základem studeného vtokového systému je vtokový kužel na který navazuje jeden nebo více rozváděcích kanálů podle povahy dílu a použité konstrukce vtoku. Rozváděcí kanál je ukončen vtokovým ústím.

Nejjednodušším provedením je středový vtok, který obsahuje pouze vtokový

kužel bez ústí. Oddělení takového vtoku od dílu je obtížné a stopa po v toku je velká a nevzhledná. Vtok s jedním příváděcím kanálem může být například boční, s více příváděcími kanály deštníkový, nebo několikanásobný. U několikanásobného vtoku nemusí být rozváděcí kanály ukončeny ústím, ale dalšími vtokovými kužely menšího průměru. Toto řešení však vyžaduje třídeskové řešení nástroje.



*Obr.3: Jednoduchý studený rozvětvený vtokový systém*

U deskovitých dílů se používá vtok štěrbinový, nebo také jiným názvem filmový, který zajistí plynulé plnění a budoucí dobré vlastnosti. Tím to způsobem lze u trubkovitých dílů vytvořit vtok tvaru membrány. Rozměry vtokového kužele jsou odvislé od velikosti potažmo hmotnosti dílu. Rozměry rozváděcích kanálů jsou závislé, na hmotnosti dílu, délce kanálu a násobnosti. U mnohonásobných forem se provádí korekce průřezů pro soudobé plnění tvarových dutin. Větvení se provádí tak, že příváděcí kanál se prodlouží až za místo dělení pro zachycení zatuhlého čela taveniny. Tvar průřezu rozváděcích kanálů je nejčastěji lichoběžníkového tvaru s jednou oblou stranou. Ideální by byl průřez kruhový, ale výrazně by prodražil výrobu, kdy by jedna polovina kanálu musela být na pevné a druhá na pohyblivé straně formy a obě poloviny slícované. Tento zjednodušený profil se dá vyrobit snadno do jedné poloviny formy. Velikost vtokového ústí určuje tloušťka stěny.

Výše zmíněné alternativy, vyjma variant pro třídeskový nástroj vyžadují oddělení vtoku dodatečné. Pro automatické oddělení vtokového zbytku od dílu se s výhodou používá tunelových vtoků. Princip spočívá v tom, že ústí vtoku

nepokračuje přímo v dělicí rovině, ale vede šikmo komůrkou ke stěně dílu. Tato komůrka vytvoří střížnou hranu, která při otevření formy a vyhození dílu a vtokový zbytek vzájemně oddělí. U pružných plastů se používá obloukový tunelový tzv. banánový vtok. Výhoda banánového vtoku spočívá v umístění vtokového ústí mimo stěnu např. do zadní nevzhledové partie dílu.

#### **2.2.2.2. Horké vtokové systémy**

Horké vtokové systémy se používají jednak pro snížení odpadového materiálu vtokových zbytků, dále k zajištění vzhledné mále stopy po vstřikování a k zajištění dobrých vlastností vstřikovaného dílu vstřikováním neochladlé hmoty.

Horký rozvod se konstrukčně provádí několika způsoby. Jednou z možností jsou vtokové kanály zvětšeného průřezu s topnými tělesy pro vyhřívání. Další možností je rozvod s kanály velmi velkého průřezu, kde plast zatuhlý na stěnách vtokového systému vytvoří izolační vrstvu, která brání dalšímu zatuhávání. Systém musí být dostatečně dimenzován, aby tomu tak během standardního cyklu bylo. Při delší odstávce hrozí u obou variant degradace plastu nebo zatuhnutí. Nástroj je pak nutno rozebrat a zatuhlý vtokový systém odstranit.

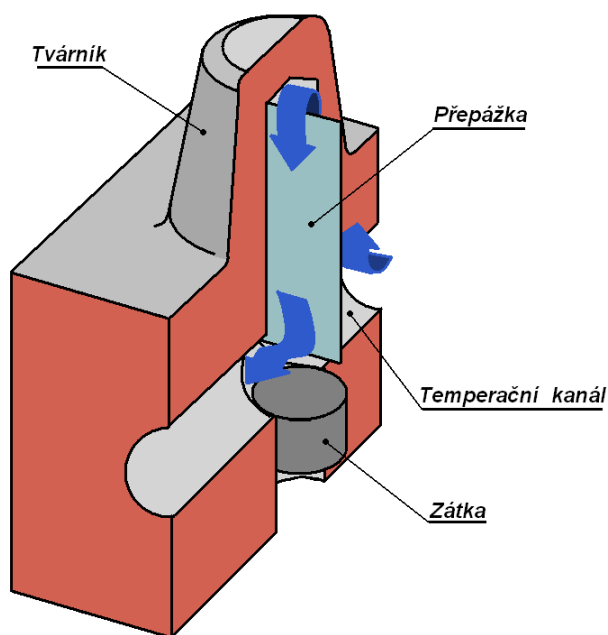
Horká tryska je ucelený konstrukční prvek, který je nejdokonalejší z horkých vtokových soustav a vtokových soustav vůbec. Běžná horká tryska obsahuje vtokový kanál s ústím, regulovatelné vytápění a teplotní čidlo. Navíc může být tryska vybavená jehlou k uzavírání vtokového ústí. Některými uzavíratelnými tryskami lze stopu po vstřikování zahladit. Horké trysky zanechávají nepatrnou stopu po vtoku a zajišťují plnění neochladlou hmotou bez poklesu tlaku a tím dávají předpoklad vzniku dílu výborných vlastností. Oproti ostatním vtokovým soustavám klesá také spotřeba zpracovávaného materiálu. Ovládatelné horké trysky se hojně využívají při kaskádovém a sekvenčním vstřikování. Postupným otvíráním a zavíráním a opětovným otvíráním se dá dosáhnout optimálního naplnění dutiny a dotlakové fáze cyklu. Jediné negativum jsou vyšší ekonomické nároky.

#### **2.2.3. Konstrukční řešení temperačního systému vstřikovacích forem**

Temperační systém formy má dva základní úkoly. Ohřát nástroj na provozní teplotu a tuto teplotu v celém nástroji udržovat během procesu. Dále musí zajistit rovnoměrný odvod tepla z dílu v co možná nejkratším čase a tím zajistit jeho dobré

vlastnosti, jednak vzhledové – rovnoměrný lesk, kvalita povrchu, ale u konstrukčních dílů hlavně vlastnosti mechanické. Doba chlazení zaujímá značnou část cyklu a její zkrácení značně zefektivňuje výrobu. Velmi často se však stává, že doba chlazení je zkracována neúměrně a dochází k výrobě dílů se špatnými vlastnostmi.

Nejrozšířenější konstrukční provedení temperačního systému je pomocí vrtaných kanálů. Temperační kanály by měly být rozmístovány blízko povrchu rovnoměrně a poměrně hustě. Je lepší použít více kanálů menšího průřezu než jeden velký, aby bylo dosaženo rovnoměrného odvodu tepla. Nutno je dbát na odvod tepla v tepelných uzlech jako jsou rohové partie dílů, zesílení stěn apod. V praxi je ale vzhledem ke zvětšující se celkové složitosti forem prakticky nemožné temperační kanály optimálně rozmístit a umístit se tam, kam je to možné vzhledem k ostatním prvkům formy. Kanály se dají následně spojit v jeden nebo více okruhů. Rychlost a teplota se dá poté řídit pomocí temperační jednotky.



*Obr.4: Použití jednoduché přepážky k chlazení tvárníku*

Jako temperační médium je používáno nejčastěji demineralizované vody. Používá se ale i olejů nebo kapalin na bázi glykolu, zejména pokud je potřeba temperovat na vyšší teploty. Pokud systém vytvořený pouze z vrtaných kanálů nevyhoví, je nutno ho doplnit. K problémům dochází většinou při chlazení jader, tvárníků, v tepelných uzlech například v místě hromadění materiálu při nevhodné konstrukci vlastního dílu. Pokud se má temperační médium dostat do jader

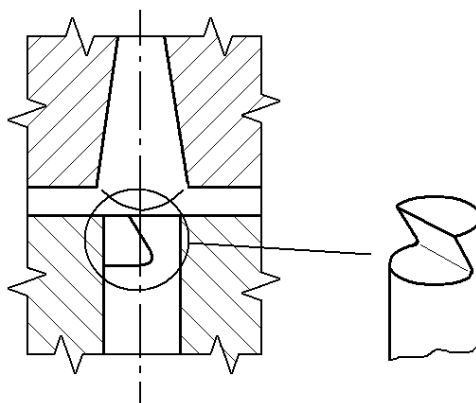


a tvárníků, je možné při větších rozměrech použít vložku s navrtanými kanály nebo šroubovou drážkou. U tenkých jader je možnost navrtat slepý kanál napojený na temperační okruh a použít přepážku k zajištění oběhu. U velmi tenkých jader, nebo uzlových míst lze využít vysoce tepelně vodivých slitinových kovů na bázi mědi, berylia apod. U rozměrných tvárníků lze použít konformního chlazení. Je to vysoce nákladná cesta výroby tvárníků buď technologií laserového spékání prášků, nebo po vrstvách skládaný tvárník, kde jsou jednotlivé vrstvy spojeny pájením.

Ve zvláštních aplikacích při výrobě specifických druhů dílů např. s vysoce lesklým povrchem, se využívá tepelných trubíc, kapalného dusíku nebo nahříváním stěn forem pomocí zářičů infračerveného světla. [1]

#### 2.2.4. Vyhazovací systém

Nedílnou součástí produkční vstřikovací formy je vyhazovací systém. Zatím co u prototypové formy kde je zpravidla vyjmutí dílu a vtokového zbytku ruční, standardní produkční forma by bez automatického vyhazovacího systému nemohla obstát. Nejrozšířenější je vyhazovací systém řešený pomocí vyhazovacích kolíků. Ty jsou ukotveny ve vyhazovací desce. Jejich pohyb je nejčastěji ovládán mechanicky a je navázán na pohyb otevírání formy. Vyhazovací mechanismus, musí být navržen a nadimenzován tak, aby spolehlivě odstranil vystříknutý díl a vtokový zbytek z příslušné dutiny formy.



*Obr.5: Vyhazovací kolík s přidržovačem vtoku*

Vyhazovací kolíky jsou válcové, nebo osazené v nejjednodušším provedení s rovinnou broušenou vyhazovací plochou. Do vyhazovací desky jsou upnuty za

hlavu která je součástí kolíku. Historii patří způsob upnutí vyhazovacích kolíků kovářským způsobem, nahřátím konce a rozkováním do kuželového vybrání. Pokud je funkční část kolíku tvarovaná, dezénovaná apod. je nutné udělat úpravu hlavy proti pootočení. Na některých vyhazovacích kolících, zejména v partiích rozváděcích kanálů nebo vtokového kuželu, se vytvářejí zápichy, sloužící jako přidržovače vtoku, které plní funkci při otevírání formy v případech kdy hrozí nebo už nastal problém, že vtokový zbytek zůstává na opačné straně formy, než je požadovaný stav. Další konstrukční provedení může být např. pomocí stíracích nebo vyhazovacích kruhů a desek, které působí např. na obvod u dílů kelímkovitého tvaru. Mechanický vyhazovač může být doplněn pomocným pneumatickým nebo hydraulickým ovládáním. Zvláštní konstrukci vyhazování dílu mají nástroje na výrobu dílů s vnitřním závitem. Zde je potřeba, pokud nemá být obsluha nástroje ruční, implementovat mechanismus - nejčastěji vytáček tvárník. Forma pak obsahuje např. převodovku s ozubenými koly a pohon např. elektromotorem nebo hydromotorem.

### 2.3. Způsoby měření a kontroly dílů vyrobených vstřikováním

Měření je číselné zkoumání vlastností předmětů, procesů apod., v daném případě užitá jako kontrola a zjištění skutečných rozměrů a tvaru dílu ku požadovaným rozměrům a tvaru v dokumentaci. Vzhledem k složitosti tvaru dílů v oblasti automobilového průmyslu jsou téměř nepoužitelná měření pomocí klasických měřidel s noniem (např. posuvné měřítko) či mikrometrických. Rozměry kotované pod úhly, v různých rovinách a zejména přesnost geometrie dílu je pomocí primitivních měřidel nemožná. Proto jsou v zásadě možné dva typy měření – měření na souřadnicových měřících strojích a optické snímání pomocí 3D scannerů.

#### 2.3.1. Měření na souřadnicových měřících strojích

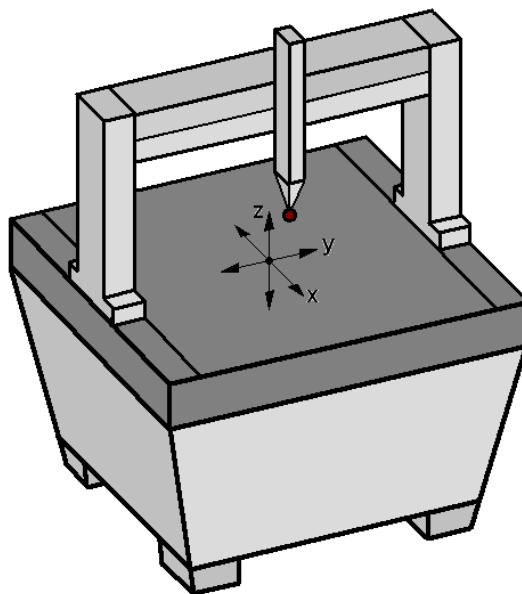
Souřadnicové měřící stroje představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření ve strojírenství. Konstrukce souřadnicových měřících strojů byla vynucena potřebou měření karoserií v automobilovém a leteckém průmyslu a potřebou měření u NC strojů ve strojírenské výrobě. Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy dalších bodů

na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z. Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru měřicího stroje je velkou výhodou oproti konvenčním metodám. Ve srovnání s tradičními způsoby měření, kde odečítání naměřených hodnot z jemných stupnic je nejen zdoluhavé, ale i namáhavé, představuje číslíkový způsob vyhodnocení výsledků u souřadnicových měřicích strojů značný krok vpřed. Mimo to je většina číslíkových souřadnicových měřicích strojů uzpůsobena tak, že je k nim připojeno zařízení pro záznam naměřených hodnot, které je automaticky registruje a zpracovává. Záznam výsledku slouží jako doklad o provedeném měření, ale může být též podkladem pro statistické metody vyhodnocování měření.

Provedení měření vyžaduje přípravu měřicího programu, kde je určena strategie, postup a poloha měření jednotlivých bodů. Specifikují se i trajektorie nájezdů k měřeným plochám. Velkou výhodou je opakovatelnost takového postupu (pokud uvažujeme moderní souřadnicový měřicí stroj, měřicí dle programu, nikoli v ručním režimu). Dále následuje vlastní měření, po kterém zpravidla následuje vytvoření měřicího protokolu. Množinu naměřených bodů lze vyexportovat a dále s nimi i pracovat v některém s CAD programů, pokud je to třeba. [2]

#### **2.3.1.1. Konstrukční uspořádání souřadnicového měřicího stroje**

Základem každého takového stroje je průměrná deska, zpravidla vyrobená z granitu opatřená pro usnadnění měření upínacími otvory se závity. Deska se vyznačuje vysokou rovinností pohybující se okolo 0,002 [mm/m]. Na desku je upnuta konstrukce s pohybovými souřadnými osami. Ty jsou dokonale vyrovnány jednak vůči sobě – kolmé a zároveň rovnoběžné s průměrnou deskou. Centrem stroje je měřicí hlavice. Ta je osazena měřicím dotekem. Používají se kulové, kuželové, talířkové, stavitelné snímací doteky. Dále také snímací doteky vícecestné. Pro měření dutin a vybrání se používají víceosé snímací doteky umožňující otáčení okolo hlavní osy o 360°. Nedílnou součástí je odměřovací zařízení založené zpravidla na fotoelektrickém principu. Nejpoužívanější uspořádání souřadnicových měřicích strojů je mostové. Existují ale souřadnicové měřicí stroje portálové, konzolové, pinolové nebo sloupové. Vedení pohybových os jsou valivá, vyskytují se ale i aerostatická vedení a to právě u mostového provedení konstrukce. [2]



*Obr.6: Schéma mostového uspořádání souřadnicového měřicího stroje*

#### **2.3.1.2. Shrnutí možností měření na souřadnicových měřicích strojích**

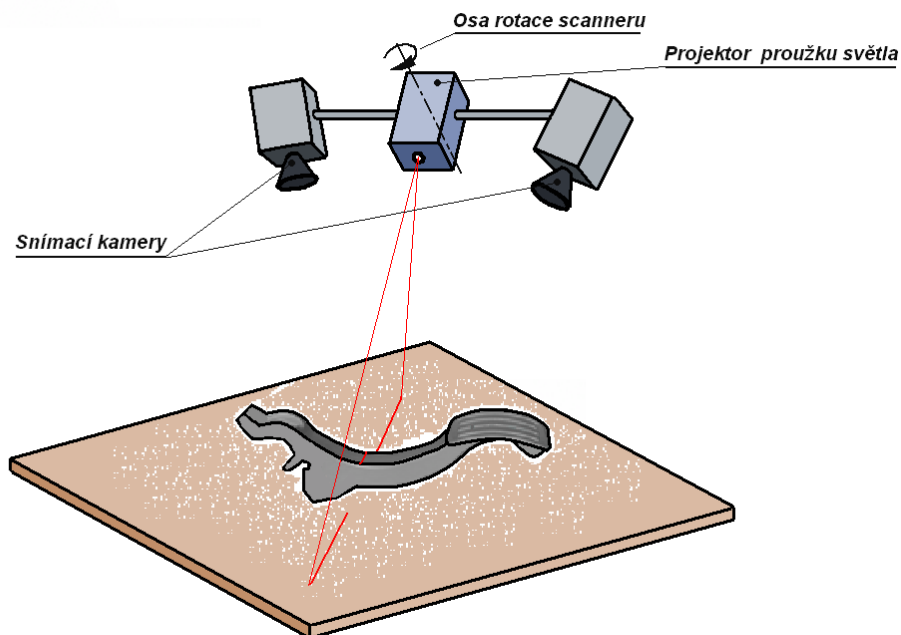
Hlavní výhodou souřadnicových měřicích strojů je jejich vysoká přesnost v řádu tisícín milimetru, opakovatelnost měření a velká universálnost. Jsou velmi vhodné pro kontrolu konkrétních rozměrů – měření jednotlivých bodů na zkoumaném tělese. Dále také měření geometrie křivek, kdy jsou například naměřené body porovnávány s matematickým vyjádřením křivky. Méně vhodné jsou na měření či zjišťování tvaru ploch i když i v těchto oblastech jsou nasazovány. Výsledkem měření nejsou plochy, ale síť bodů, která se musí dále zpracovat a k dosažení uspokojivého výsledku musí být velmi hustá.

#### **2.3.2. Snímání pomocí 3D scanneru**

Nasazení 3D scanneru znamenalo značnou inovaci v digitalizaci předmětů nejen v průmyslové praxi. Uplatnění tohoto zařízení je v průmyslu hlavně v prototypové výrobě a reverzním inženýrství. Velmi vhodné je 3D snímání pro analýzu zborcení tvaru výrobků z plastu oproti požadovanému tvaru. Metoda je rychlá, poměrně přesná, ale finančně nákladná, přesto značně usnadnila digitalizaci předmětů.

#### **2.3.2.1. Konstrukční uspořádání 3D scanneru a způsob snímání**

Základ 3D scanneru jsou dvě kamery a zdroj proužku světla, většinou laser. Tyto tři elementy jsou propojeny s řídicím systémem. Světelný paprsek je promítán na povrch snímaného předmětu a zdeformovaný průmět proužku je snímán dvěma pod úhlem skloněnými kamerami. Postupným přesunem proužku po povrchu předmětu je získán 3D obraz. Už z principu vychází jeden z nedostatků. 3D scannerem nelze snímat hluboké úzké výdutě a otvory. Omezení je dané průsečíkem zorných úhlů snímacích kamer. Další problém nastává při snímání transparentních nebo černých těles, kdy je snímání bez úpravy povrchu prakticky nemožné. K úpravě povrchu se používá nástřík jemným křídovým práškem, který umožní snímání. Moderní trendy se ale snaží tyto nedostatky vyřešit a pro snímání dutin je scanner dovybaven snímací dotekovou hlavou podobného provedení jako na souřadnicových měřicích strojích, která je spojena s kamerami a díky tomu je scanner schopný vytvořit i obraz dutin. Snímání transparentních těles je možno řešit pomocí promítání proužku polarizovaného světla. Tyto nadstavby však výrazně prodražují již tak nákladnou technologii 3D scannování. Scanner se před měřením kalibruje pomocí desky s přesně rozmístěnými body. I na snímáný předmět je umístěno několik takových bodů, pro snazší orientaci scanneru v prostoru. Tato nutnost s postupným zdokonalováním scannerů pomalu odpadá. Přesnost scanneru se liší podle provedení. Přesností v řádu desetin se vyznačují scannery kompaktního provedení naváděné lidskou rukou. Scannery vybavené stojanem s vedeními v jednotlivých osách jsou o řád přesnější.



*Obr.7: Schéma způsobu snímání 3D scanneru*

#### **2.3.2.2. Shrnutí nasazení a možností měření na 3D scanneru**

3D scanner je efektivní prostředek digitalizace těles. Vyznačuje se velkou rychlostí snímání, dají se pomocí něj po částech snímat i velmi rozměrné předměty. Kompaktní ruční provedení se dá nasadit i na terénní měření mimo laboratoř. 3D scannery mají nižší přesnost než souřadnicové měřicí stroje, jejich efektivita při snímání ploch je však výrazně větší. Navíc se dají snímat pružná a plastická tělesa, která se při dotykovém snímání bortí.

## **2.4. Simulace vstřikování**

Následující text části článku plasticportal.cz má posloužit jako úvod do části věnované simulacím vstřikování

Tečení taveniny v dutině formy je komplikovaný proces. Zejména u dílů s proměnnou tloušťkou stěn lze jen ztěžím odhadnout, zda bude dutina formy správně naplněna a kde mohou vzniknout vady. Design plastových dílů je v dnešní době stále složitější a komplexnější. Navíc designéři plastových dílů často nemají znalosti technologie vstřikování plastů ani plastových materiálů a netuší, jaké komplikace způsobují navrženým designem dílu konstruktérům forem a lisovně.

V praxi nelze bez pomoci spolehlivého simulačního softwaru založeného na plnohodnotné 3D technologii výpočtu odhadnout problémy, které mohou při výrobě nastat. Zvláště v době ekonomické krize a všeobecné snahy o úsporu nákladů je třeba si uvědomit, že nejefektivněji lze šetřit náklady předcházením problémů. Proto je třeba zpracovat simulaci vstřikování již ve velmi rané fázi vývoje produktu, a to nejlépe již při vývoji designu dílu, nejpozději však při konstrukci formy, ještě předtím, než je forma vyrobena a provedeny její první zkoušky. Toto si uvědomují zejména větší nadnárodní firmy, které interně 3D simulační softwary pro analýzu designu plastových dílů (resp. forem) používají, či požadují zpracování 3D simulace vstřikování jako součást výroby formy či dodávky samotných vzorových dílů. U středních a menších firem se dnes otázka vlastnictví simulačního softwaru stává předmětem konkurenceschopnosti firmy na trhu. [3]

#### **2.4.1. Nasazení simulace při návrhu formy**

Jak ukazuje praxe, simulace jsou velmi nápomocny při návrhu dílu. Analýza plnění dokáže celkem spolehlivě určit místa problematická při plnění, polohu studených spojů, určit vhodnou polohu vtokového ústí - připravit díl. V následujícím textu bude poukázáno na možnosti a úskalí použití simulace vstřikování při návrhu vstřikovací formy.

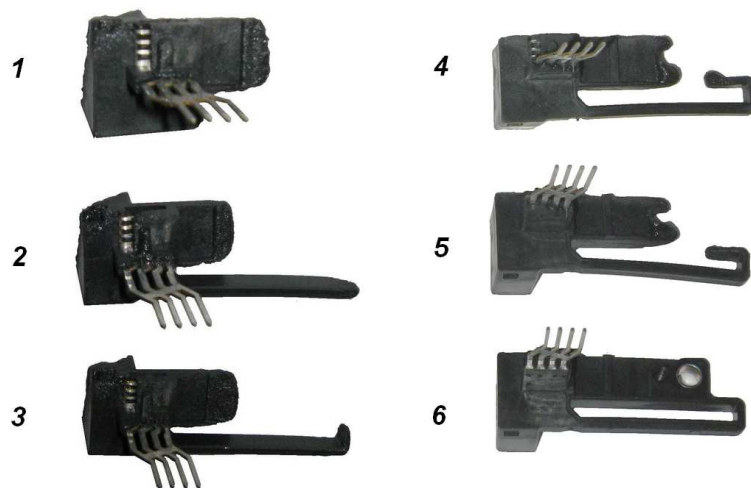
Nástrojárna obdrží zpravidla model požadovaného dílu a jeho výkresovou dokumentaci. Již při přebírání projektu bývá většinou určena poloha vtokového ústí. V případě automobilového průmyslu se mnohdy jedná o složité díly, s velmi úzkými tolerancemi rozměrů a tvaru o řád i dva nižší než je například smrštění použitého

polymerního materiálu. Mnohdy jsou tolerance rozměrů na úrovni tolerancí pro díly vyrobené z kovů, které mají desetkrát nižší tepelnou roztažnost a mnohem vyšší stabilitu rozměrů. Hlavním úkolem je tedy zhotovit formu s dutinou, která zajistí, že po ztuhnutí a vychladnutí dílu se díl smrští a zdeformuje do požadovaných rozměrů. Klasické metody kdy je na tvarových vložkách ponechán přídavek a po odzkoušení formy jsou na základě naměřených hodnot rozměry dutiny zkorigovány, nejsou vzhledem ke složitým tvarům mnohdy možné.

Simulace má tedy v tomto případě přispět k docílení získání takové tvarové dutiny, která zajistí požadovaný tvar a rozměry dílu. Využívá se modulu procesu chlazení a sním spojených deformací a krystalizace. Proces tedy začne prvotní simulací, kterou se nechá zdeformovat získaný model a na základě této prvotní simulace a prvních výsledku deformací, je třeba model dílu upravit. Nejlépe je model zparametrizovat, aby byl snadněji upravitelný, zejména ve smyslu geometrie. Pokud se jedná o díl zcela odlišný od již zpracovávaných dílů v minulosti, nedá se v prvotních fázích projektu uvažovat rozmístění chlazení a je nutno uvažovat rovnoměrný odvod tepla. Na model, který je negativem tvarové dutiny, je virtuálně v podstatě obtisknut do okolního materiálu, který je pomocí dělicí roviny nebo více dělicích rovin rozdělen na budoucí tvarové vložky. Strategie tvorby formy jsou v zásadě 2. Jedna vychází z nitra ven od tvarových vložek směrem k rámu nástroje, druhá strategie naopak začíná rámem a postupuje směrem k tvarovým vložkám. Jak bude ve formě vyřešen temperační systém je zřejmé až ve značné rozpracovanosti projektu. Teprve s touto znalostí je možno přistoupit k dalšímu kroku a odsimulovat proces s chlazením s nerovnoměrným odvodem tepla podle namodelovaného temperačního systému. Obě zmíněné simulace předpokládají, že jsou k dispozici potřebná data materiálu, z něhož má být díl vyráběn. Po této simulaci je třeba model dutiny a všech dílů, jež tato změna ovlivní, přemodelovat. Je to operace časově náročná a vesměs nejde spolehlivě zautomatizovat. Poté může být návrh formy dokončen, ještě jednou provedena simulace s finálním provedením dutiny, vtokového a temperačního systému, provedeny opět korekce příslušných dílů, připravena dokumentace a zahájena výroba formy. Některé díly, jako například součásti rámu formy, pokud nejsou použity normálie, mohou být vyráběny v předstihu. Tyto díly však představují malou část pracnosti celé vstřikovací formy. Je nutno zmínit, že



v simulacích byly předpokládány podmínky vstřikování a na základě těchto předpokládaných podmínek je vyráběn nástroj. Po výrobě nástroje nastává fáze odzkoušení a naladění provozních podmínek a procesních parametrů pro výrobu.



*Obr.7: Ukázka náběhu výroby dílu s několika zálsky na zcela nově vyrobené formě*

Tyto podmínky se ale mohou výrazně lišit od předpokládaných podmínek, které sloužily jako podklady simulací a následné výroby formy. Jednak se musí podmínky měnit, když nelze za daných podmínek díl úspěšně vyrobit, běžně se ale podmínky vstřikování mění hlavně z ekonomického hlediska k dosažení vyšší efektivity nebo alespoň rentability projektu. Po odzkoušení jsou odebrány vzorky, které jsou následně podrobeny měření. Pokud se podaří při prvním vzorkování dosáhnout stavu, že je požadovaných rozměrů dílu možno dosáhnout pouze úpravami stávajících tvarových vložek dá se mluvit o úspěchu. Na základě těchto poznatků jsou provedeny korekce, zpravidla bez nutnosti simulace a je dosaženo plně funkčního nástroje. Cesta k předání hotového nástroje však bývá komplikovanější a nákladnější. Pokud je nutno provést zásadnější zásahy do geometrie, je nutno vyrobit tvarové vložky, nejnákladnější část formy, znovu. Používají se i opravárenské technologie jako například laserové navařování apod. Opravované díly však nejsou zpravidla plnohodnotné a jejich trvanlivost není tak vysoká jako u dílů bez oprav. Záruka bezporuchového provozu po statisíce cyklů je u takového dílu nasnadě. Na závěr je možno provést simulaci za známých procesních podmínek a porovnat ji se skutečností.

Je zřejmé, že konstruktér formy nemá v klíčovou dobu k dispozici všechna potřebná data. Je tedy stále třeba velkých osobních zkušeností jednotlivců či týmů a simulace slouží jako pomocný prvek.

Ve strojírenství se hojně rozmohly simulační softwary ve všech odvětvích. To bylo umožněno vývojem výpočetní techniky, která umožnila nasazení metody konečných prvků. Matematicky popsat chování taveniny plastu při celém procesu vstřikování je poměrně komplikovaný úkol. Pokud je navíc polymerní materiál aditivován plnivem např. vyztužujícími vlákny, matematický popis takové taveniny je ještě mnohem komplikovanější.

V následujícím textu je provedeno odsimulování při znalosti všech provozních parametrů, tedy již po odzkoušení a doladění parametrů na automobilovém díle, vyrobeného z dvou typů plastů vyztužených skelnými vlákny. U každého z nich je jiný obsah skelných vláken. Výsledek simulace je porovnán s reálnými naměřenými deformacemi. Simulace byla vytvořena pomocí softwaru CADMOULD 3D-F.

### 3. Praktická část

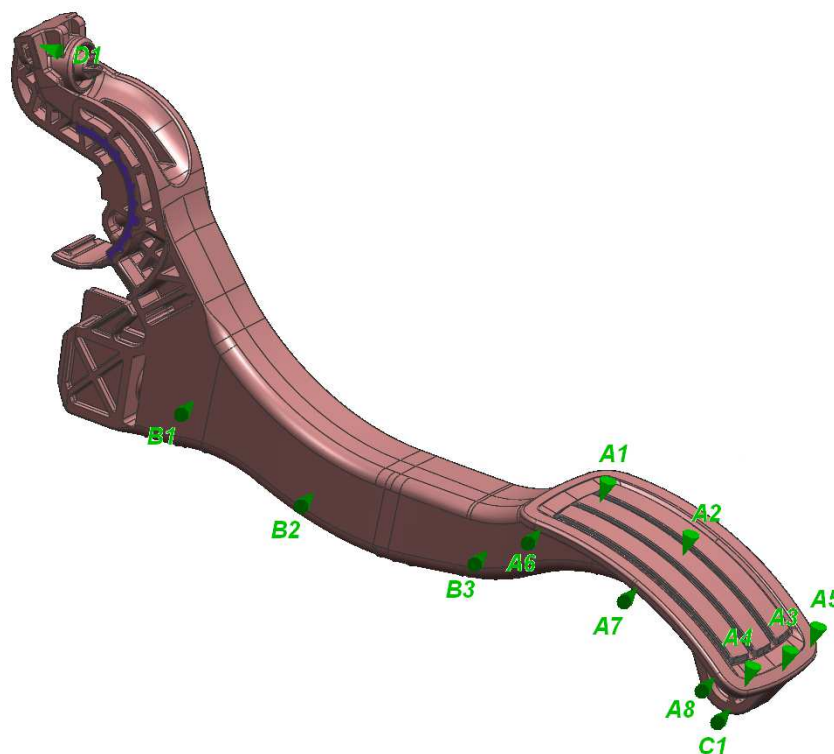
#### 3.1. Cíl práce

Cílem diplomové práce bylo určit přesnost simulace vstřikování vybraného dílu, vyrobeného z polymeru vyztuženého skelnými vlákny. Simulace byla porovnána s daty získanými pomocí 3D optického scanneru. Přesnost opticky nasnímaných dat byla potvrzena pomocí měření na souřadnicovém měřicím stroji.

#### 3.2. Podklady pro simulaci

Simulace byla provedena na základě provozních parametrů, zjištěných při vlastní výrobě dílů, které byly později porovnávány s výsledky simulace.

##### 3.2.1. Zvolený díl



*Obr.8: Zvolený díl s vyznačenými kontrolními body, oblast A – vlastní pedál, B – tělo pedálu, C - doraz pedálu, D – oblast uložení pedálu, hlava pedálu*

Jako díl pro zjišťování přesnosti simulace byl vybrán automobilový pedál. Díl poměrně složité konstrukce, s četným žebrováním, proměnnou tloušťkou stěn a důrazem na velkou rozměrovou přesnost. Díl je dvoukomponentní, tedy vyroben z dvou druhů polymerních materiálů. Základ, vlastní tělo, pedálu je z polyamidu vyztuženého skelnými vlákny. V místě uložení jsou nastříknutá lůžka z termoplastického elastomeru. Pro porovnání byl díl za stejných podmínek odstříknut z dvou druhů polyamidů s různým obsahem vyztužujících vláken. Pro potřeby porovnávání bylo na díle zvoleno 13 kontrolních bodů pro exaktní porovnávání odsimulovaných a naměřených hodnot deformace.

### 3.2.2. Materiály použité při výrobě dílu

V obou případech se jedná o polyamid PA6 plněný vyztužujícími vlákny. Následující tabulka udává několik vybraných základních materiálových vlastností.

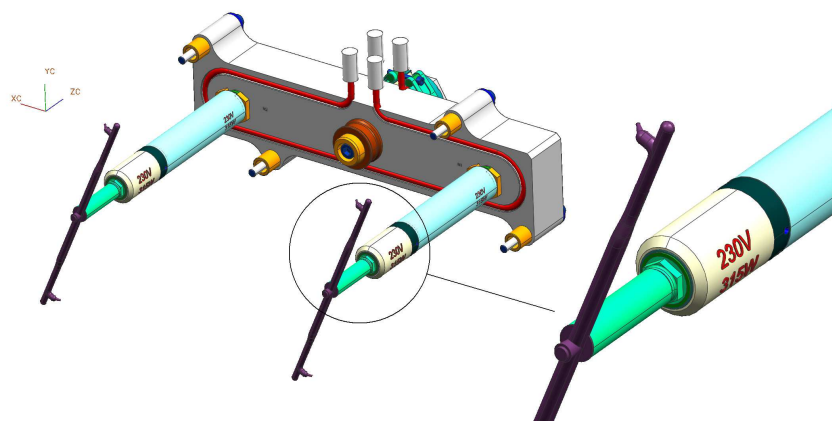
*Tab.1: Vybrané vlastnosti materiálů použitých k výrobě těla dílu*

Druh plastu	<b>Utramid B3WG10</b> Vysušený /Kondicionovaný	<b>Akulon K224-HG6</b> Vysušený /Kondicionovaný
Báze [ - ]	PA6	PA6
Obsah skelných vláken [%]	50	30
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1550/*	1350/*
Modul pružnosti v tahu [MPa]	16700/11000	9500/6000
Mez pevnosti v tahu [MPa]	225/150	180/110
Smrštění v podélném směru [%]	0,3/*	0,2/*
Smrštění v příčném směru [%]	0,3/*	1,1/*
Navlhavost [%]	4,5-5,1	6,3/*
Výrobce	BASF	DSM

[4], [5]

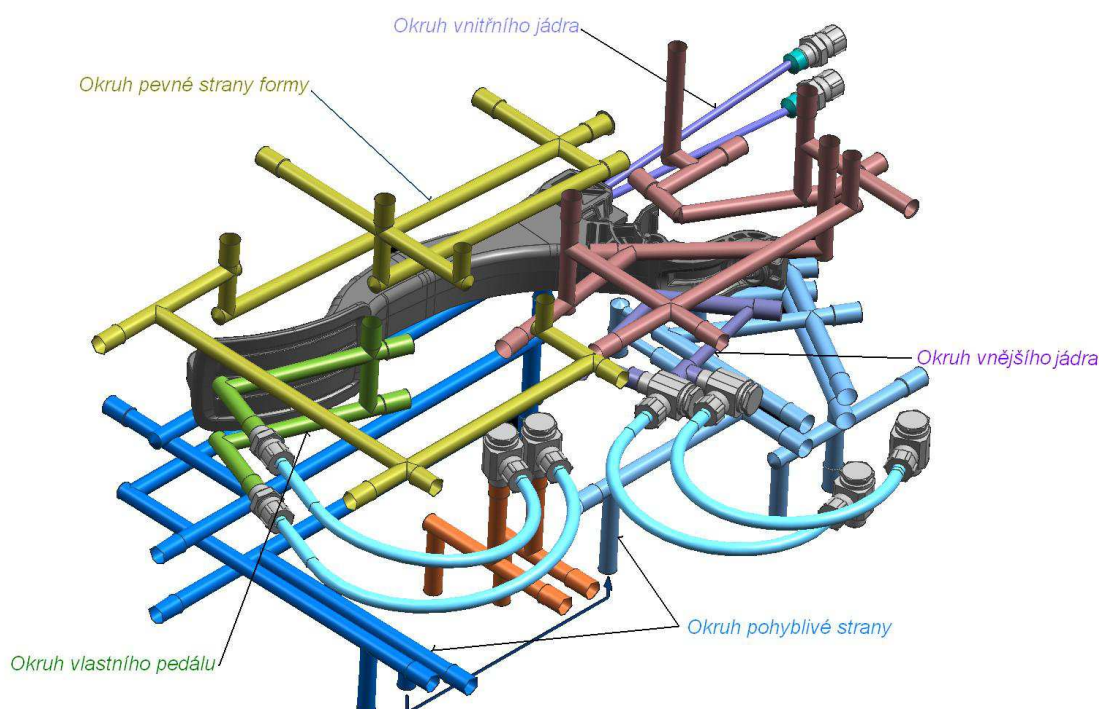
### 3.2.3. Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je čtyřnásobná čelistová dvoukomponentní. Druhý komponent je nastříknut ve stejné dutině, po odsunutí šoupátek a jader. Vtokový systém je kombinovaný. Základem vtokového systému je horký rozváděcí blok s dvěma horkými tryskami.



*Obr.9: Kompletní vtokový systém s detailem jedné studené větve (NX4 - Synventive)*

Na horkou trysku navazuje jednoduchý studený vtokový systém zakončený tunelovým vtokem. Studená část rozvodu je proti vtokovému kuželu opatřena přidržovačem. Každá z trysek zajišťuje naplnění dvou dutin. Ovládání přepnutí na vstřík druhého komponentu je hydraulické, doplněné mechanickým hřebenovým mechanismem. Temperační systém je řešen pomocí vrtaných kanálů. V okolí každé dutiny je několik okruhů. Dva hlavní, každý na jedné straně formy. Na pohyblivé straně je tento dělený propojený. Další jsou tři pomocné okruhy. Dva jsou v prostoru jader a jeden v prostoru vlastního pedálu.



*Obr.10: Temperační systém v přímém okolí dutiny formy (NX4)*

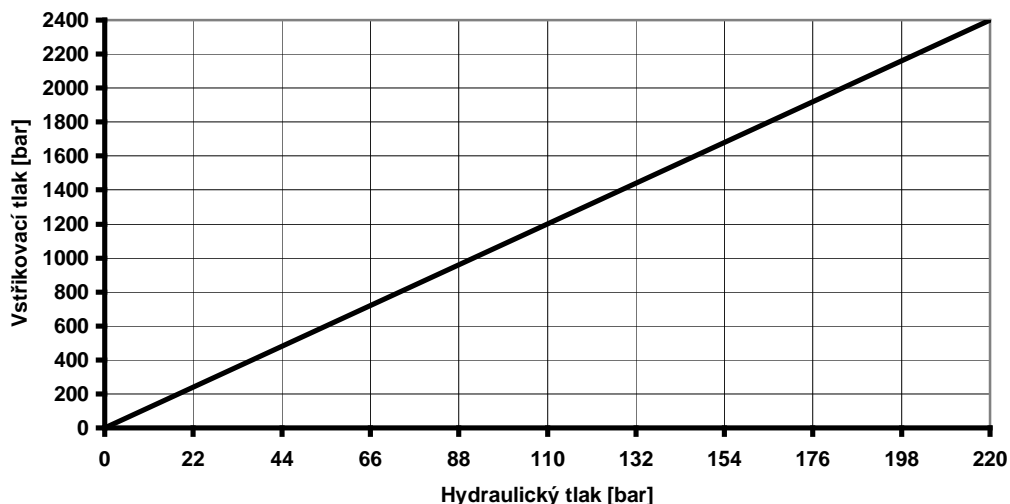
### 3.2.4. Procesní podmínky

Při zkouškách byla ve formě v provozu pouze jedna pracovní tvarová dutina. Ostatní tři dutiny měly jednoduchý náhradní tvar. Úprava dutin byla provedena vzhledem k velikosti stroje, u kterého nebylo možné vstříkovat malé množství plastu pouze pro jednu dutinu. Vtokové kanály do náhradních dutin byly vybaveny škrcením pro seřízení a vyrovnaní odporu v jednotlivých dutinách. Podmínky na vstřikovacím stroji, za kterých byly nastříknuty pedály z obou typů plastů jsou v následující tabulce.

Tab.2: Reálné podmínky procesu vstřikování

Číslo dílu:	0 280 XXX XXX
Číslo formy:	SZ 10 XXX XXXX
Počet kavit:	1+3
Vstřikolis - průměr šneku [ mm ]	80
Granulát:	Ultramid B3WG10/ Akulon K224-HG6
Datum vzorkování:	12.12.2011. 10.2.2012
Tenlota nástroje - nevná strana [°C ]	85
Teplota nástroje - pohyblivá strana [°C ]	80
Zavírací síla [ kN ]	2000
Vstřikovací rychlost [ mm/s ]	30/45/45/45/45/45/45/45/35/20
Vstřikovací tlak (hydraulický) [ bar ]	135
Čas plnění [ s ]	2,25
Bod přepnutí (od dráhy) [ mm ]	24
Dotlak (hydraulický) [ bar ]	65/60/55/50/45/45/40/35/30/30
Čas dotlaku [ s ]	11
Čas chlazení [ s ]	30
Protitlak (hydraulický) [ bar ]	8/8/8/8/8
Velikost dávky (mm ) [ mm ]	90
Obvodová rychlost šneku [ m/s ]	0,25
Dekomprese - po dávkování [ mm ]	15
Teplota válce [°C ]	290/290/290/290/285/280/275
Teplota horkého vtoku [°C ]	325/295/325/295/295/295
Čas cyklu [ s ]	67

Hodnoty vstřikovacího tlaku a hodnoty dotlaku jsou snímány v hydraulickém systému stroje. Pro potřeby simulace bylo třeba tyto hodnoty přepočítat na hodnoty tlaku ve vstřikovací dutině v tavenině plastu. K určení hodnot vstřikovacího tlaku slouží diagram výrobce stroje.



*Obr.11: Diagram vstřikovacího tlaku Engel 800Duo (D80)*

Z diagramu je zřejmé, že převodový poměr vstřikovacího tlaku vůči tlaku hydraulickému je cca 11 [ - ] přesně 10,909 [ - ]. [6]

### 3.3. Simulační model a vlastní simulace

Simulace respektovala reálné podmínky vstřikování. Pro použité vstřikované materiály byla získána funkční data, která pro Ultramid B3WG10 v počátcích práce nebyla dostupná. Byla uvažována pouze část vstřiku těla pedálu bez druhého komponentu. Vzhledem k malým rozměrům druhého komponentu je ovlivnění vlastního těla naprosto minimální. Doba chlazení je ale brána jako doba od dostříknutí těla, do vyhození dílu. Je tedy započítána i doba kdy je vstřikován druhý komponent, aby byly dodrženy podmínky chlazení ve zkoumaných částech pedálu.

#### 3.3.1. Model vtokového systému

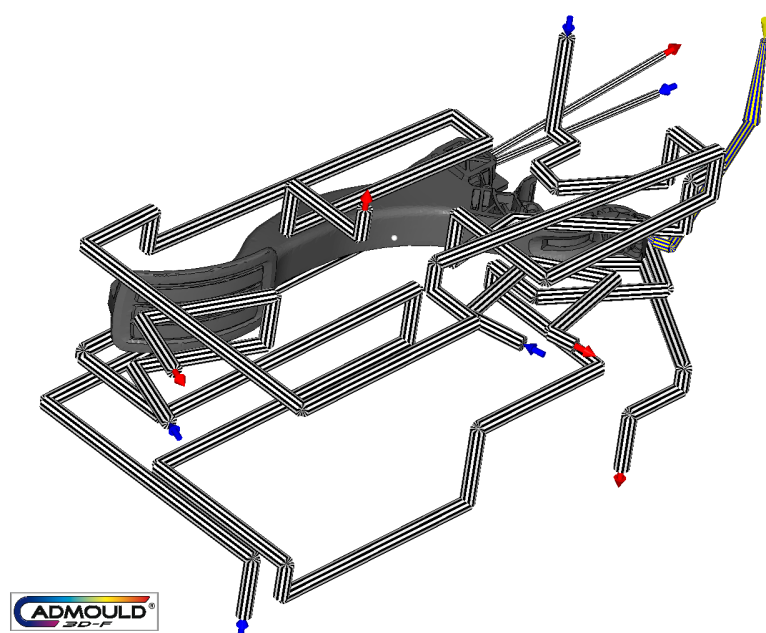
Vtokový systém odpovídal studené části rozvodu pro první dutinu. Bylo zkoušeno doplnit vtokový systém o horký rozváděcí blok, výsledky simulace se ale v tomto případě nelišily. Vtokový kužel o rozměrech  $\varnothing 3,3/8,4 \times 50$  [ mm ] , vtokový kanál o rozměrech  $\varnothing 6 \times 110$  a  $\varnothing 6 \times 8$  [ mm ] a tunelové ústí vtoku o rozměrech  $\varnothing 4/2 \times 5$  [ mm ]. Všechny tři části byly namodelovány jako studený rozvod.



*Obr.12: Vtokový systém v simulaci (CADMOULD 3D-F)*

### 3.3.2. Model temperačního systému

Model temperačního systému v okolí dutiny byl vymodelován tak, aby přesně odpovídal reálnému stavu se všemi pěti okruhy. Teplota okruhu na pevné straně byla 85 [°C]. Na ostatních čtyřech okruzích, které jsou na pevné části pohyblivé straně i na třech pohyblivých čelistech byla teplota 80 [°C].

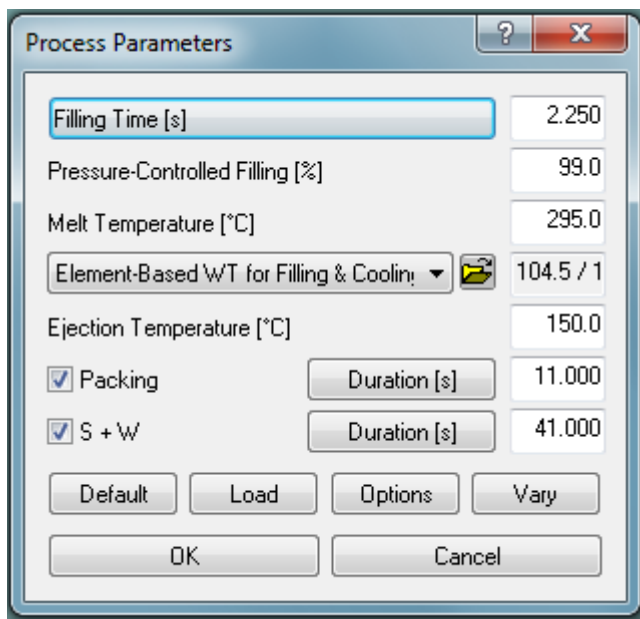


*Obr.13: Temperační systém v simulaci (CADMOULD 3D-F)*



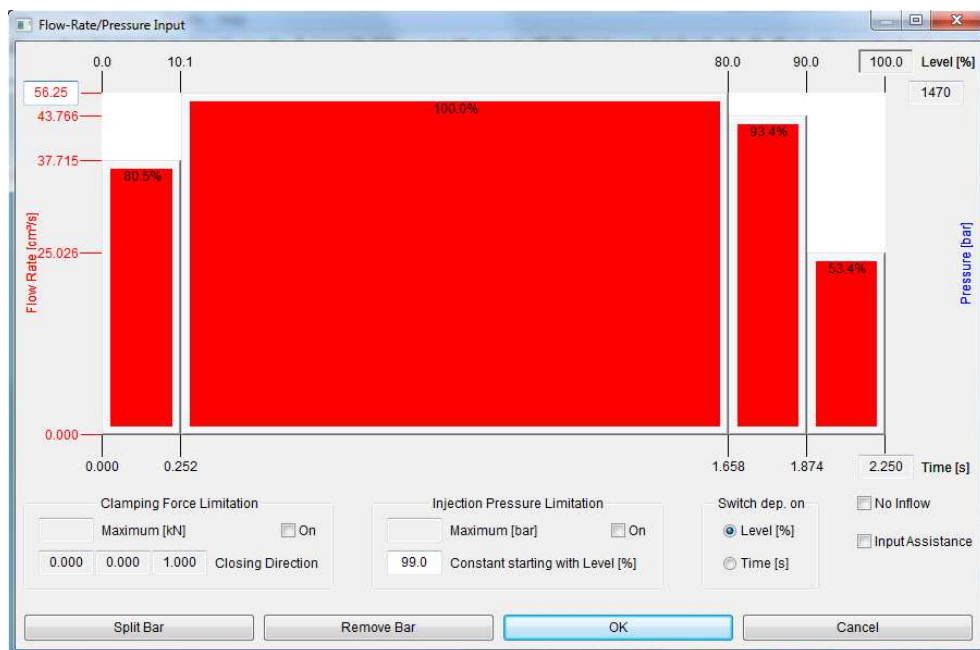
### 3.3.3. Zadané podmínky vstřikování

Vstupní teplota taveniny pro materiál Ultramid B3WG10 byla nastavena na 295 [°C], je to teplota defaultní a teplota, kterou má horký rozvod čtyři šestiny vstřikovacího času. Teplota horké trysky je během vstřiku řízena. Na počátku je teplota 325 [°C] poté je nařízen pokles na 295 [°C] následně zvýšení na původní teplotu a opět pokles na 295 [°C] po zbytek vstřiku.

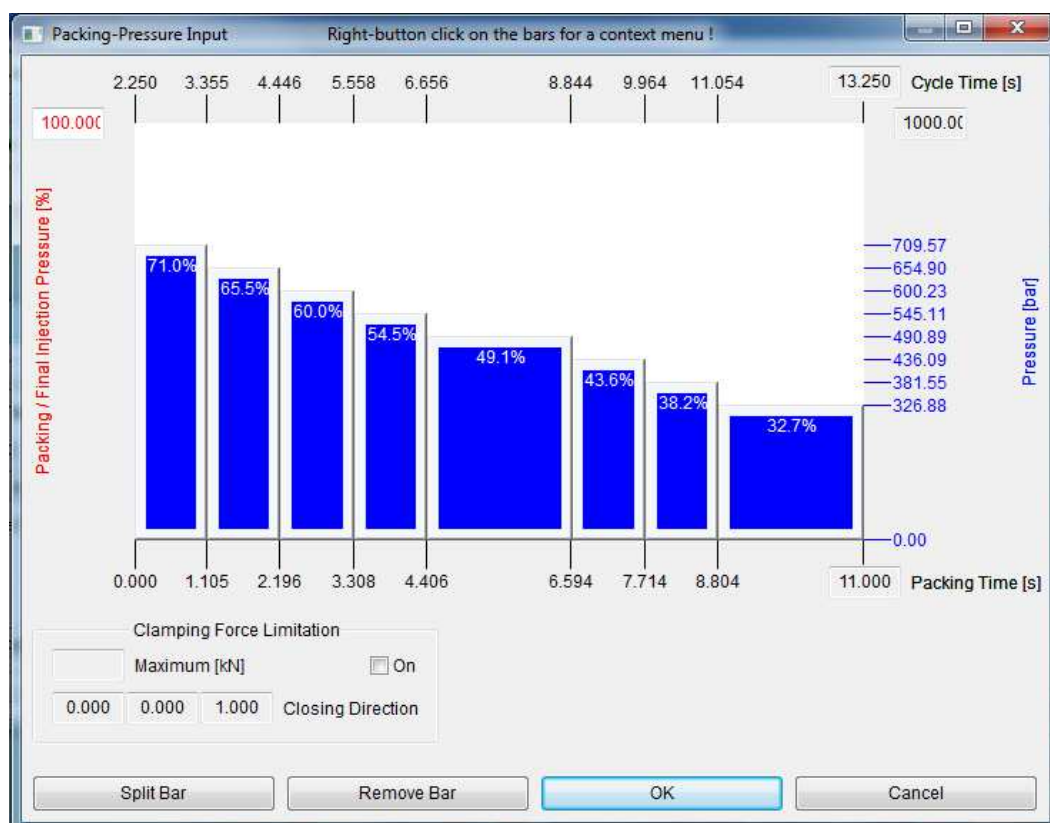


Obr.14: Vyplněné menu parametrů vstřikovacího procesu v Cadmouldu ( Filling Time – Čas plnění, Melt Temperature – Teplota taveniny, Ejection Temperature – Teplota při vyhození, Packing – Dotlaková fáze, S+W – Smrštění a deformace)

Délka plnění je 2,25 [ s ]. Vstřikovací rychlost dosahuje hodnoty 45 [mm/s] (jednotky odpovídají dopředného pohybu šneku vstřikovací jednotky). Náběh na začátku a pokles rychlosti v závěru vstřikování byl respektován. V simulačním softwaru je rychlost vstřikování dosazována v jednotkách [ cm<sup>3</sup>/s ]. Pro přepočet byla brána v úvahu průmětná plocha čela šneku a počet dutin. Vypočtené hodnoty v konstantní části odpovídaly defaultním hodnotám, které vygeneroval software.



Obr.15: Nastavení průběhu vstřikovací rychlosti a tlaku v Cadmouldu (Flow Rate – vstřikovací rychlost, Pressure – vstřikovací tlak, Time – čas)



Obr.16: Nastavení průběhu dotlakové fáze v Cadmouldu (Packing / Final Injection pressure – poměr dotlaku vůči finálnímu vstřikovacímu tlaku, Packing Time – Čas dotlaku, Pressure – Tlak)

Celková doba chlazení byla zadána 41 [ s ]. Z toho dotlaková fáze 11 [ s ]. Dotlak byl na stroji nastaven tak, že stupňovitě klesal a na počátku byl roven 65 [bar] (hydraulický), což je zhruba polovina vstřikovacího tlaku 135 [bar] (hydraulický). Průběh dotlaku zadaný do simulace přesně kopíroval hodnoty na stroji.

S takto nastavenými podmínkami byla simulace úspěšně provedena.

### 3.4. Měření

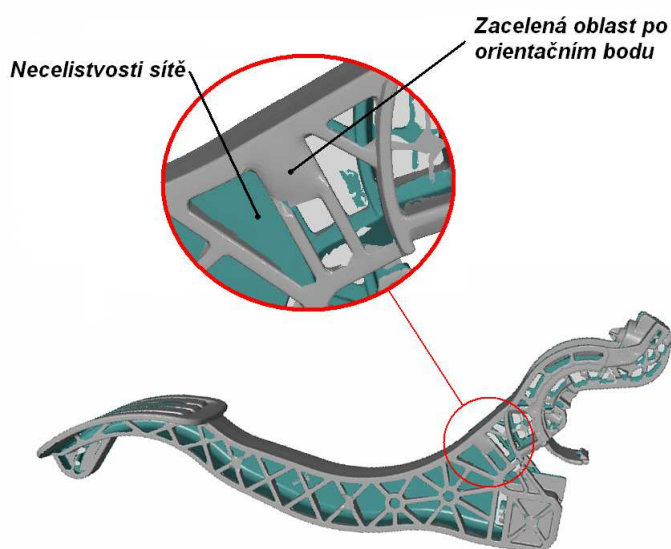
#### 3.4.1. Měření pomocí 3D scanneru

Pro získání komplexní představy o geometrii zkušebních vzorků byla nasazena technologie 3D scannování. Pedál vzhledem k svému designu, konstrukčnímu řešení a provedení je typickým zástupcem podmíněčně scannovatelných předmětů. Konstrukce plná žeber, hlubokých úzkých otvorů, znemožňuje získat kompletní celistvou síť. Pro dosažení co nejúplnější sítě je nutné předmět scannovat z mnoha směrů. Toto však může mnohdy způsobit nepřesnosti vzhledem k přeurlčitosti některých partií, proto byl v daném případě zvolen kompromis a získán 3D obraz pouze partií podstatných pro potřeby diplomové práce. Pro porovnání geometrie necelistvá síť postačuje. Dalším nevhodnou vlastností je barva dílu. Černá barva lze jen obtížně opticky snímat, proto musel být povrch upraven nástřikem speciálního křídového spreje. Dále byl povrch dílu opatřen několika kontrolními body. Takto upravený díl, byl nasnímán optickým 3D scannerem ATOS II 400, vyznačujícím se přesností v řádu setin milimetru (maximální deklarovaná přesnost je 0,02 [ mm ] ). Výsledkem snímání byla necelistvá síť. Zacelena byla pouze místa po orientačních bodech.



*Obr.17: Porovnání dílu bez křídového nástřiku (nahore) a dílu s křídovým nástřikem (dole) za stejných světelných podmínek, díl opatřený křídovým nástřikem je opatřen orientačními body pro potřeby scanneru*

Pro potřeby porovnání byly důležité venkovní partie dílu, vlastní pedál, souvislá část těla a válcové plochy v místě uložení pedálu, které jsou klíčové pro určení rozměrové základny. Rozměrovou základnou je v tomto případě osa těchto dvou válcových ploch. Všechny tyto části byly nasnímány jen s minimálními defekty v požadované kvalitě. Získaná síť mohla být postoupena k dalšímu zpracování.



*Obr.18: Síť získaná 3D scannerem (GOMInspect)*

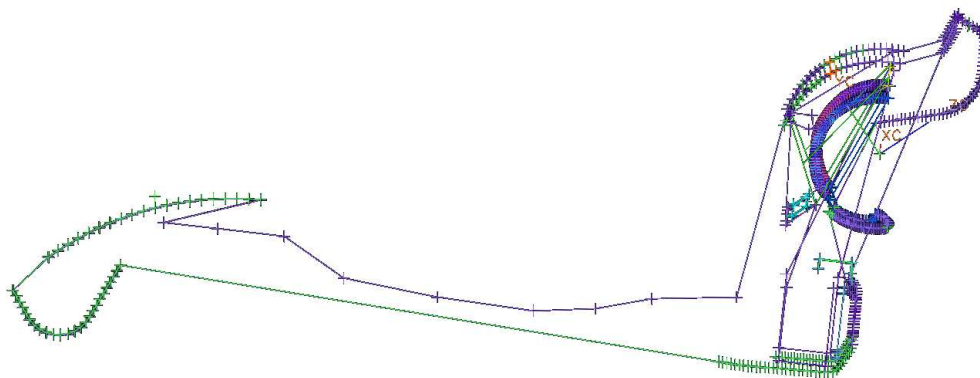
### 3.4.2. Měření na souřadnicovém měřicím stroji

Měření na souřadnicovém měřicím stroji proběhlo nezávisle na diplomové práci pro potřeby zhotovitele formy k tvorbě protokolu o měření a stanovení skutečných rozměrů dílu k porovnání s požadovanými rozměry ve výkresové dokumentaci. Vybrané naměřené body byly přeneseny do CAD softwaru a tím získaná jednoduchá kostra dílu, která byla s výhodou použita pro kontrolu dat, získaných optickým snímáním na 3D scanneru, vzhledem k tomu, že dotekové měření na souřadnicovém měřicím stroji dosahuje o řád vyšší přesnosti měření. Vznikla možnost porovnat hodnoty získané dotekovým a optickým měřením.



*Obr.19: Měření pedálu jiného tvaru na souřadnicovém měřicím stroji WENZEL  
LH87*

Pro potřeby měření byl díl v žebrované části v místě, kde se nacházejí 2 kruhové otvory opatřen závit pro upnutí na stojánek, který byl ustaven a upnut na průměrnou desku souřadnicového měřicího stroje. Na základě geometrie dílu byl vytvořen program s měřicí strategií. Měření proběhlo na souřadnicovém měřicím stroji WENZEL LH87. Měření bylo provedeno na třech zkušebních dílech z materiálu Ultramid B3WG10 a na dvou dílech z materiálu Akulon K224-HG6.



*Obr.20: Kostra tvořená body naměřenými na souřadnicovém měřicím stroji (NX4)*

Naměřené body byly načteny do CAD programu a propojeny pomocí úseček. Na základě naměřených bodů v oblasti uložení, byla stanovena rozměrová základna naměřené kostry. Tím byly podklady získané ze souřadnicového měření připraveny k porovnávacím pracím.

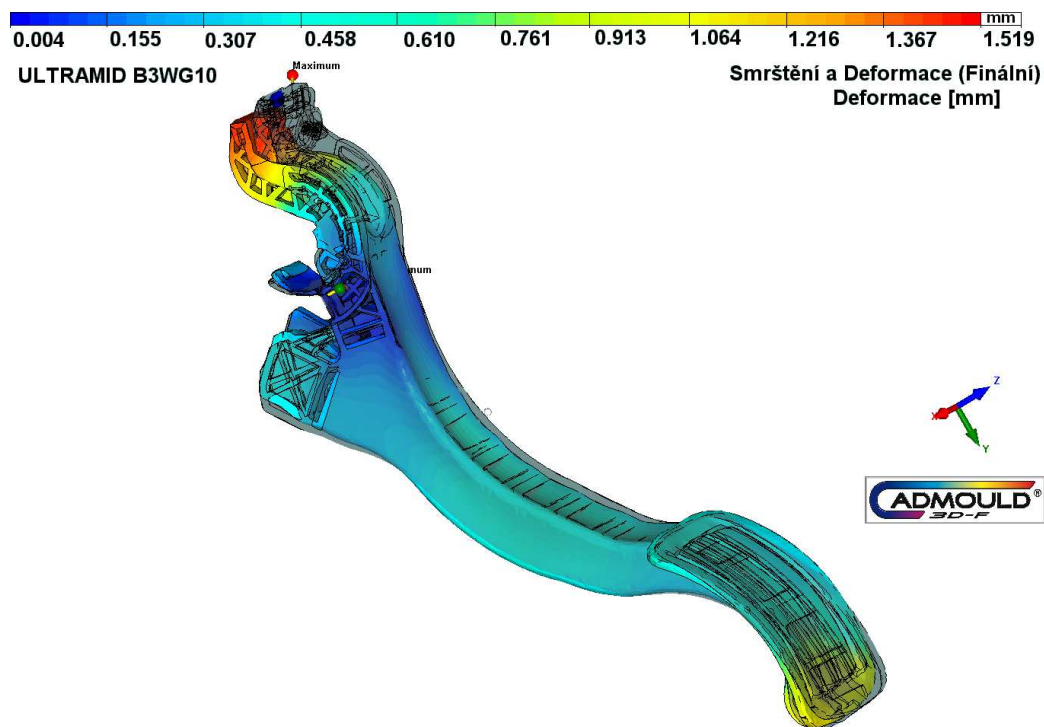
### 3.5. Získané výsledky

#### 3.5.1. Získané výsledky pro materiál Ultramid B3WG10

##### 3.5.1.1. Výsledky simulace

Po nastavení všech parametrů, proběhla úspěšně simulace plnění a chlazení v simulačním softwaru CADMOULD 3D-F. Jako výsledek měření byla vybrána finální deformace, čistá bez smrštění. Program umožňuje zobrazení deformace i smrštění. Tyto je schopen zobrazit, během plnění chladnutí a konečné. Je schopen zobrazit deformaci komplexní, nebo v jednotlivých směrech X,Y a Z. Pro potřeby diplomové práce bylo třeba získat normálovou deformaci vzniklou v kontrolních bodech. U kontrolních bodů na bocích pedálu (B1 až B3, A6 až A8 a C1), bylo možné hodnotu přímo odečíst jako deformaci ve směru X. V ostatních bodech se musela výsledná normálová deformace skládat z deformací v jednotlivých směrech. Před vlastním odměřováním byl načten počátek souřadného systému do osy válcových ploch uložení s definovanou polohou a směrem natočení. S osou uložení byla ztotožněna osa X souřadného systému.

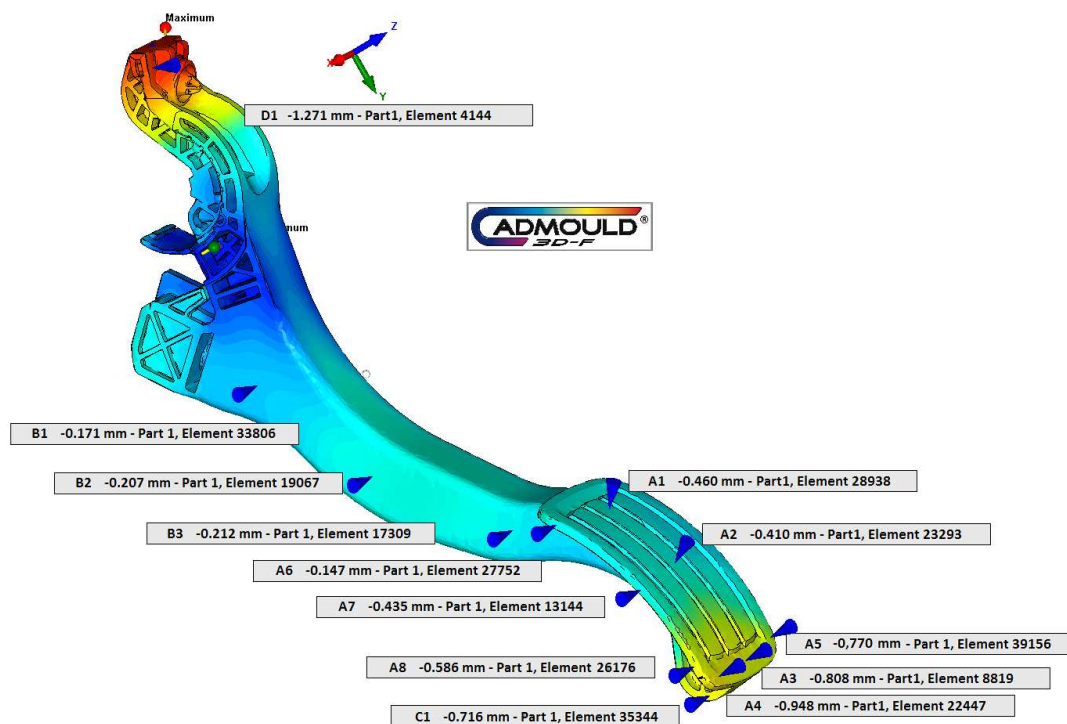
Pro názornost byla ještě zobrazena komplexní deformace se zvýrazněním oproti původnímu stavu. Původní stav je v tomto případě ve formě stínu. Opět s transformovaným počátkem souřadného systému.



*Obr.21: Zobrazení celkové finální deformace u materiálu Ultramid B3GW10, stín znázorňuje původní tvar dutiny formy (CADMOUD 3D-F)*

Pokud pedál vlastním pedálem postavíme proti pozorovateli, je jasná tendence deformace těla pedálu směrem doprava v oblasti středu vlastního pedálu okolo 0,5 [mm]. Poměrně největších hodnot deformace dosahuje hlava pedálu, kde deformace dosáhla hodnoty 1,5 [mm].



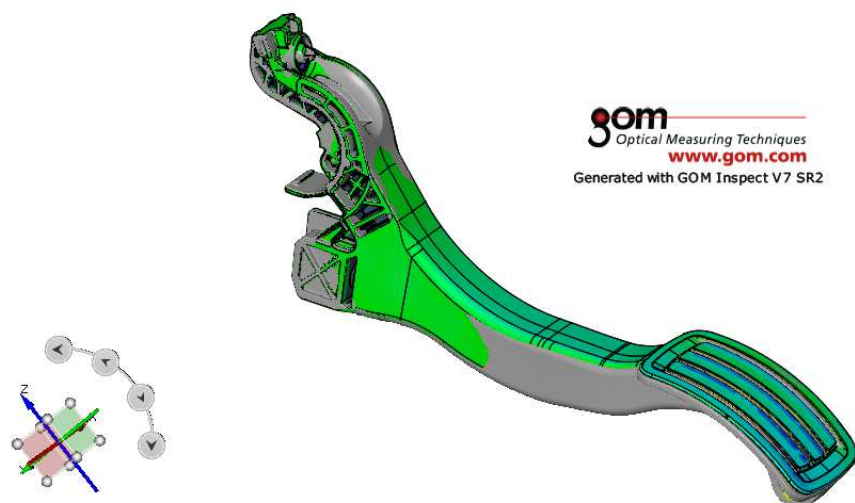


Obr.22: Zobrazení nasimulovaných normálových deformací v kontrolních bodech u materiálu Ultramid B3GW10 (CADMOUD 3D-F)

### 3.5.1.2. Výsledky 3D optického snímání

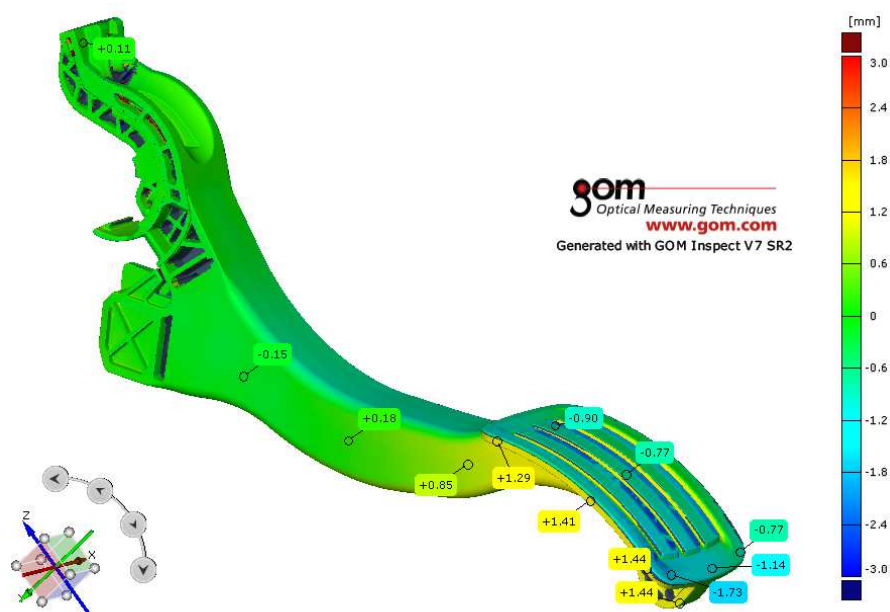
Sít' získaná pomocí 3D scanneru byla načtena do softwaru GOMInspect a spolu s ní byla načtená také geometrie dutiny formy. Obě geometrie byly ztotožněny v místě uložení pomocí funkcí programu. Bylo vybráno ztotožnění za válcové plochy uložení, za jednu boční a jednu svislou plochu k odebrání všech stupňů volnosti. Obě tyto dodatečně vybrané plochy se nacházely v bezprostředním okolí válcových ploch uložení, aby byla respektována stále stejná strategie a odměřování odchylek bylo relevantní.





Obr.23: Porovnání opticky nasnímané sítě s CAD geometrií dutin formy, naměřená síť je šedá (GOMInspect)

Již na první pohled je vidět tendence deformace. Pedál v oblasti vlastního pedálu se v postavení vlastním pedálem proti pozorovateli deformuje směrem doleva. Deformace v oblasti hlavy uložení je poměrně nízká. Velikost deformace v místě vlastního pedálu je přibližně 1,4 [mm], v místě hlavy pouze asi 0,2 [mm]. Již na první pohled jsou vidět značné rozdíly od výsledků simulace.



Obr.24: Zobrazení opticky naměřených normálových deformací v kontrolních bodech u materiálu Ultramid B3GW10 (GOMInspect)

### 3.5.1.3. Výsledky dotekového měření na souřadnicovém měřicím stroji

Výsledky měření na souřadnicovém stroji byly použity hlavně pro kontrolu dat nasnímaných optickou cestou. Z naměřené kostry bodů, byly vybrány body nacházející se ve stanovených místech bodů kontrolních. Následně byly v CAD softwaru NX 4 naměřeny jednotlivé odchylky vybraných bodů od modelu dutiny formy. Software neumožňuje názorné zobrazení všech odchylek, ale vždy jedné konkrétní. Proto byly odchylky v jednotlivých kontrolních bodech sepsány do tabulky. Protože měření neprobíhalo primárně pro potřeby diplomové práce, neobsahuje hodnoty v některých z kontrolních bodů

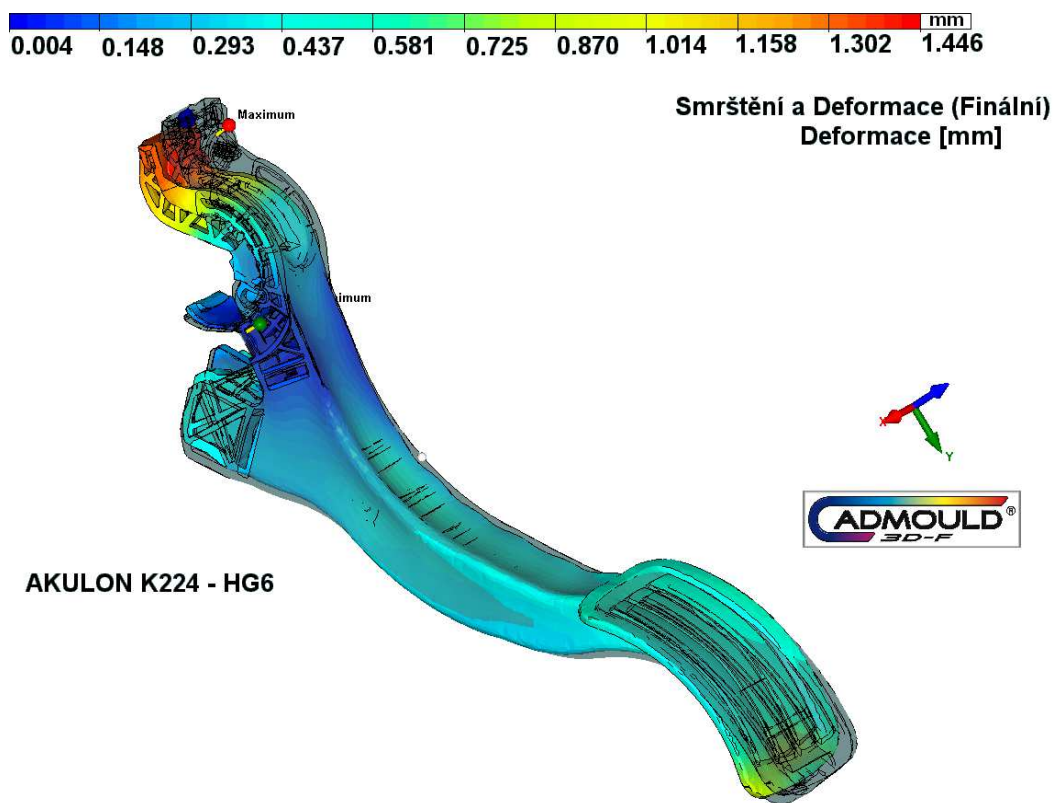
*Tab.3: Odchylky bodů, naměřených pomocí souřadnicového měřicího stroje, od modelu dutiny formy*

<i>Kontrolní bod</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A7</i>	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>D1</i>
<i>Hodnota odchylky [mm]</i>	-0,64	-0,61	-1,02	1,55	-0,12	0,16	0,87	0,17

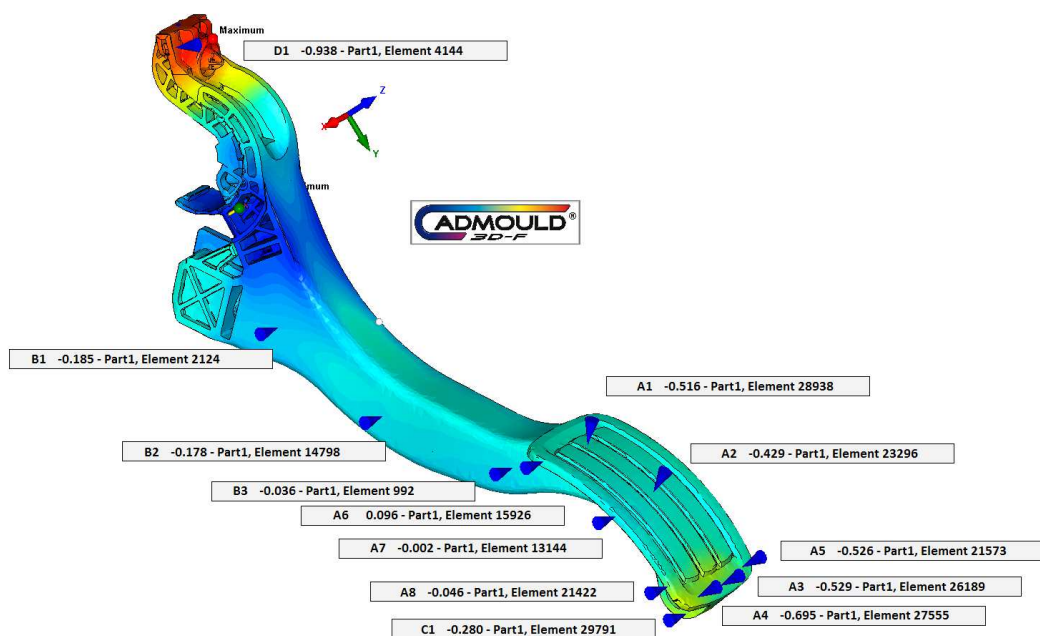
### 3.5.2. Získané výsledky pro materiál Akulon K224-HG6

#### 3.5.2.1. Výsledky simulace

Za stejných procesních podmínek byla v softwaru CADMOULD 3D-F provedena simulace pouze se změnou materiálu. Stejně jako u předchozího případu byla jako výsledek měření brána finální deformace bez smrštění. Velikost deformace byla snímána stejným způsobem. V poloze proti pozorovateli je stejná tendence deformace těla a pedálu směrem doprava ale menší intenzity. V oblasti středu vlastního pedálu je odchylka téměř nulová. Poměrně největších hodnot deformace opět dosahuje hlava pedálu, hodnota deformace je ale také menší a dosáhla maximální hodnoty 1,3 [mm].



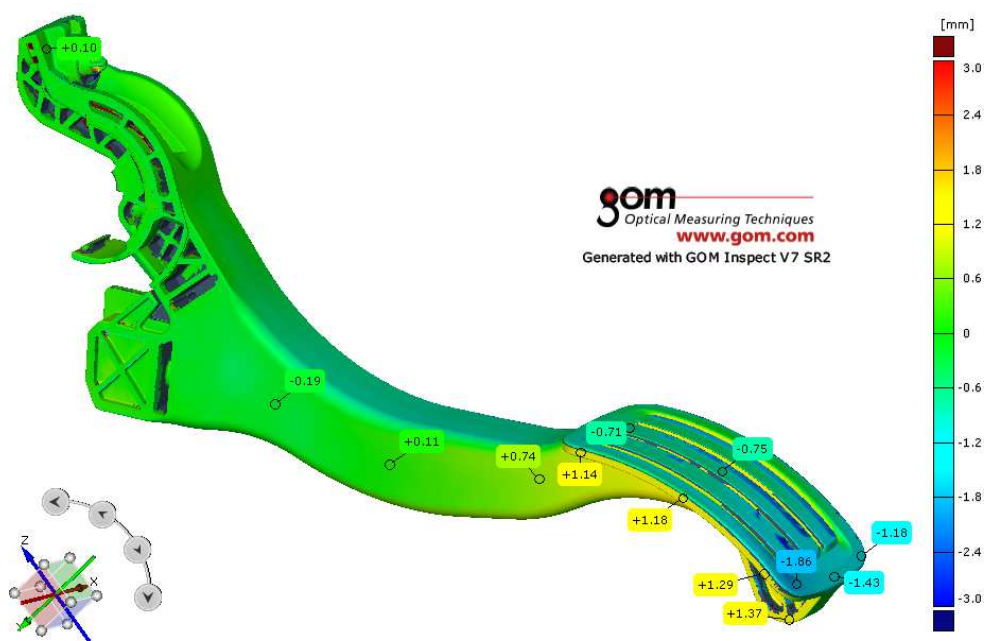
Obr.25: Zobrazení celkové finální deformace u materiálu Akulon K224 – HG6, stín znázorňuje původní tvar dutiny formy (CADMOUD 3D-F)



Obr.26: Zobrazení nasimulovaných normálových deformací v kontrolních bodech u materiálu Akulon K224 – HG6 (CADMOUD 3D-F)

### 3.5.2.2. Výsledky 3D optického snímání

Výsledky snímání byly zpracovány shodným způsobem jako u předchozího dílu. Tendence deformace jsou stejné, ale menší intenzity. Pedál v oblasti vlastního pedálu se v postavení vlastním pedálem proti pozorovateli deformuje také směrem doleva. Deformace v oblasti hlavy uložení je shodně nízká, její velikost v místě vlastního pedálu je přibližně 1,2 [mm] v místě hlavy pouze asi 0,2 [mm].



Obr.27: Zobrazení opticky naměřených normálových deformací v kontrolních bodech u materiálu Akulon K224-HG6 (GOMInspect)

### 3.5.2.3. Výsledky dotekového měření na souřadnicovém měřicím stroji



Obr.28: Ukázka měření vzdálenosti naměřeného bodu od plochy modelu tvarové dutiny formy (NX 4)

Odchytky byly měřeny stejným způsobem jako v předchozím případě v CAD softwaru NX 4.

*Tab.4: Odchytky bodů, naměřených pomocí souřadnicového měřicího stroje, od modelu dutiny formy*

<b>Kontrolní bod</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A7</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>D1</b>
<b>Hodnota odchytky [mm]</b>	-0,73	-0,75	-1,46	-	-0,19	0,10	0,72	0,25

### 3.6. Vyhodnocení

#### 3.6.1. Porovnání kontaktního a optického měření

Jak již bylo předesláno, nezávisle provedené dotekové měření na souřadnicovém měřicím stroji bylo v práci použito jako kontrolní element dat získaných optickým snímáním. Je nutné zmínit, že stanovená základna pro měření je fiktivní a její určení zásadním způsobem ovlivňuje výsledky měření. Zatímco při vyhodnocování dat v příslušném programu optického scanneru, umožňuje ztotožnění ploch s přípustnou odchylkou, je ztotožnění méně náchylné na lokální nepřesnost. V případě Souřadnicového měření jsou pomocí několika naměřených bodů na válcových plochách uložení řídicím systémem stroje vygenerovány středy kružnic a jejich spojením vzniká první ze souřadných os. Vzhledem k tomu, že body nejsou přesně v kruhu, není je možno použít ke ztotožnění s válcovou plochou uložení a ztotožňuje se právě tato osa. Již z principu může vzniknout chyba v ustavení. Jedna setina milimetru nepřesnosti v uložení se projeví v řádu desetin na konci pedálu. Ustavit díl shodně ve dvou softwarech s poněkud jiným principem ztotožňování je tedy technicky téměř nemožné. Každé měření je navíc zatíženo chybou. Zatímco Optické snímání má přesnost v řádu setin milimetru, u kontaktního měření je to o řád vyšší přesnost, tedy tisíce milimetru.

Naměřené deformace v bočním směru se většinou liší jen o několik setin milimetru. Maximální vzájemné odchytky jsou v řádu čtyř desetin milimetru a to ve svislém směru, kde hraje roli nestejně ustavení resp. natočení pedálu. Lze říci, že

scanner pracuje na vrchní hranici své přesnosti a na data získaná pomocí scanneru ATOS II 400 je možno nahlížet jako na vysoce věrohodná.

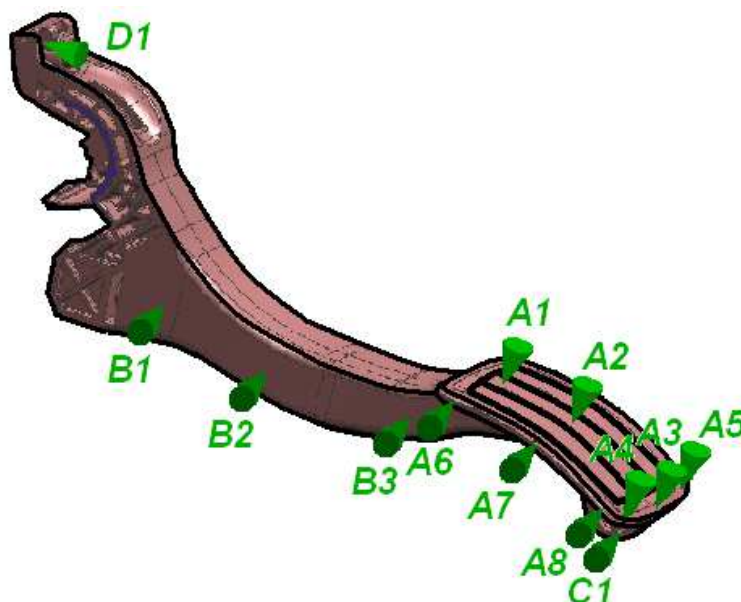
### **3.6.2. Porovnání výsledků simulace s výsledky měření**

Již při zběžném prohlédnutí je zřejmé, že hodnoty deformací, které vyšly pomocí simulace neodpovídají realitě. Je nutno brát v úvahu, že tak dokonalé vstupní parametry nemá konstruktér či projektový tým vyvíjející formu na začátku projektu k dispozici. I přes striktní dodržení podmínek vstřikování při simulaci jsou hodnoty deformací buď několikanásobně vyšší než ve skutečnosti, nebo je jejich směr opačný.

Číselné zhodnocení je nejlépe zřejmé na dvou rozměrech a to rozměru A7 – bok vlastního pedálu a D1 – hlava pedálu. Zde jsou k dispozici i tolerance rozměrů daných výkresovou dokumentací. U materiálu Ultramid B3WG10 činí odsimulovaná deformace v bodě A7 – 0,44 [mm] naproti tomu skutečná hodnota deformace je + 1,41 [mm], při toleranci  $\pm 0,5$  [mm] nemá šanci konstruktér, který se bude simulací řídit dosáhnout rozměru shodného s výkresovou dokumentací. V kontrolním bodě D1, kde je tolerance  $\pm 0,2$  [mm], je deformace ze simulace -1,27 [mm], skutečná deformace je pouze +0,11 [mm] a navíc v opačném směru. Zde už je možnost dosažení shodného rozměru zcela bezpředmětné. U materiálu Akulon K224 – HG6 je situace podobná. V bodě A7 stojí proti sobě hodnota 0,00 [mm] a +1,18 [mm], v bodě D1 jsou to hodnoty -0,94 [mm] a +0,10 [mm]. Je patrné, že zde je rozdíl menší, na dosažení shodných rozměrů v případě respektování simulace to ale stále nestačí.

Zhodnocení deformací a jejich tendencí dává možnost polemiky ohledně správnosti simulace v jednotlivých partiích pedálu. Jediná partie, ve které se simulace blíží realitě je zakřivení plochy vlastního pedálu. Zde ale není tak přísná tolerance a oprava příslušné čelisti formy není tak nákladná. Mnohem podstatnější deformace, zejména zakřivení těla pedálu, které ovlivňuje polohu vlastního pedálu a deformace hlavy jsou zcela mimo realitu. Výsledky simulace se tedy dají hodnotit jako mírně řečeno neuspokojivé.

V následujících tabulkách a grafech jsou porovnány hodnoty odsimulovaných a naměřených deformací v jednotlivých kontrolních bodech pedálu. Pro názornost je ještě jednou uvedeno rozmístění kontrolních bodů.

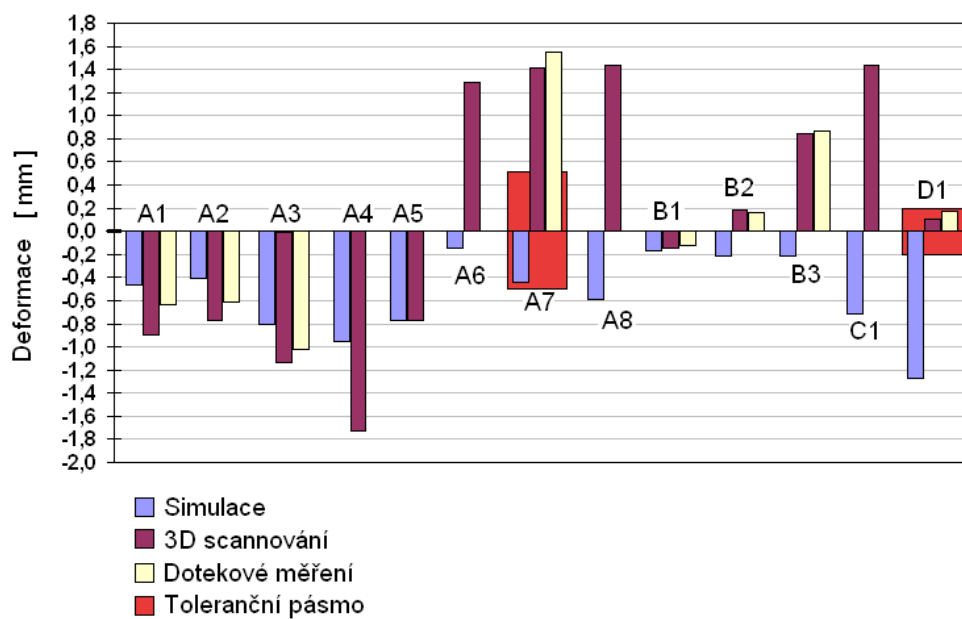


Obr.29: Rozmístění kontrolních bodů na dílu

### 3.6.2.1. Porovnání pro Ultramid B3WG10

Tab.5: Hodnoty deformací pro Ultramid B3WG10

Kontrolní bod	Hodnota deformace simulace [mm]	Hodnota deformace - 3D scanner [mm]	Hodnota deformace - dotekové měření [mm]	Výkresová tolerance [mm]
A1	-0,46	-0,90	-0,64	-
A2	-0,41	-0,77	-0,61	-
A3	-0,81	-1,14	-1,02	-
A4	-0,95	-1,73	-	-
A5	-0,77	-0,77	-	-
A6	-0,15	+1,29	-	-
A7	-0,44	+1,41	+1,55	±0,5
A8	-0,59	+1,44	-	-
B1	-0,17	-0,15	- 0,12	-
B2	-0,21	+0,18	+0,16	-
B3	-0,21	+0,85	+0,87	-
C1	-0,72	+1,44	-	-
D1	-1,27	+0,11	+0,17	±0,2



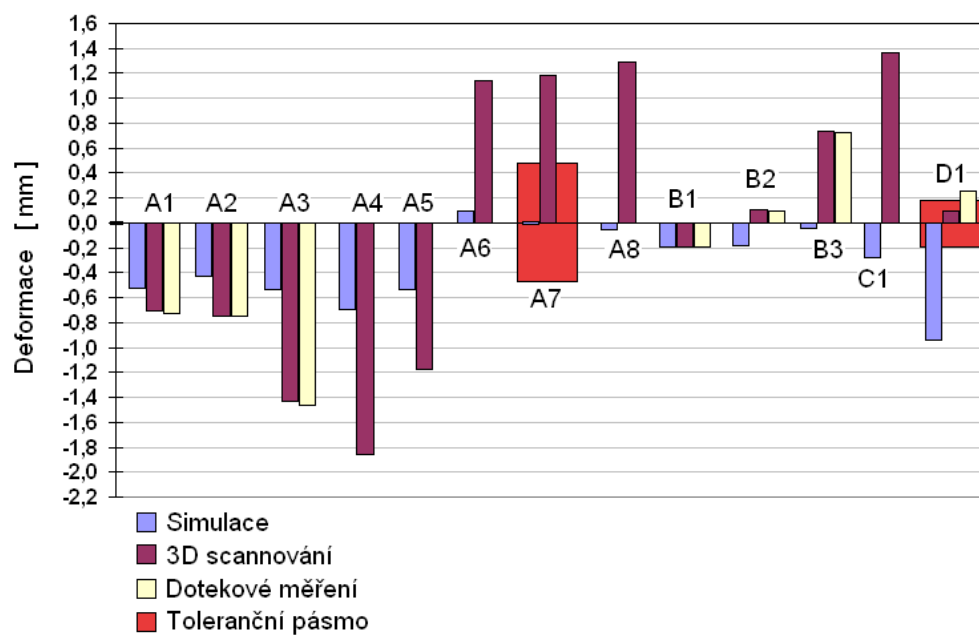
Obr.30: Grafické znázornění rozdílů deformací pro Ultramid B3WG10

### 3.6.2.2. Porovnání pro Akulon K224-HG6

Tab.6: Hodnoty deformací Akulon K224-HG6

Kontrolní bod	Hodnota deformace simulace [mm]	Hodnota deformace - 3D scanner [mm]	Hodnota deformace - dotekové měření [mm]	Výkresová tolerance [mm]
<i>A1</i>	-0,52	-0,71	-0,73	-
<i>A2</i>	-0,43	-0,75	-0,75	-
<i>A3</i>	-0,53	-1,43	-1,46	-
<i>A4</i>	-0,70	-1,86	-	-
<i>A5</i>	-0,53	-1,18	-	-
<i>A6</i>	+0,10	+1,14	-	-
<i>A7</i>	0,00	+1,18	-	±0,5
<i>A8</i>	-0,05	+1,29	-	-
<i>B1</i>	-0,19	-0,19	-0,19	-
<i>B2</i>	-0,18	+0,11	+0,10	-
<i>B3</i>	-0,04	+0,74	+0,72	-
<i>C1</i>	-0,28	+1,37	-	-
<i>D1</i>	-0,94	+0,10	+0,25	±0,2





Obr.31: Grafické znázornění rozdílů deformací pro Akulon K224 - HG6

## 4. Závěr

Dílem užitým v práci pro hodnocení simulace byl zvolen automobilový pedál. Díl se vyznačuje složitou konstrukcí. Je bohatě žebrován, tloušťka stěny je proměnná. Zkušební vzorky byly zhotoveny z dvou druhů polyamidů plněných skelnými vlákny v různém poměru. Jeden z materiálů obsahoval 50% skelných vláken, druhý materiál 30%. Procesní podmínky byly pro oba materiály stejné a byly zaznamenány.

Na základě těchto záznamů, geometrie dutiny formy a konstrukčního uspořádání vtokového a temperačního systému formy byl vytvořen simulační model procesu. Ten byl bez obtíží odsimulován.

Pro porovnání výsledků simulace se zkušebními vzorky bylo nutné stanovit metodu měření. Jako nejvhodnější byla vybrána metoda optického snímání pomocí 3D scanneru, která poskytla ucelený obraz o rozměrech a geometrii měřených dílů. Nezávisle na diplomové práci proběhlo měření na souřadnicovém měřícím stroji. Výsledky tohoto měření byly pro potřeby práce poskytnuty a posloužily jako kontrolní prvek, který potvrdil dobrou přesnost optického snímání. Nasnímaná síť byla podrobena porovnání.

Jako parametr pro vyhodnocení správnosti simulace byla zvolena deformace dílu bez smrštění. Síť nasnímaná 3D scannerem byla tedy porovnávána s modelem dutiny formy nezvětšeným o míru smrštění. Simulace proběhla na stejném modelu dutiny formy a jako výsledný výstup byla zobrazena pouze čistá deformace bez smrštění. Na dílu bylo stanoveno 13 kontrolních bodů, ve kterých byla zjištěna hodnota deformace v simulaci i v naměřených datech. Aby byly hodnoty deformací porovnatelné, byl užíván stále stejný způsob ustavení dílu a stejný počátek souřadného systému.

Na základě zjištěných skutečných i nasimulovaných deformací byla vyhodnocena přesnost simulace. U materiálu Ultramid B3WG10 byly deformace zjištěné simulací ve většině klíčových partií dílů chybné. Deformace těla pedálu měřená na konci byla ve skutečnosti

trojnásobná a měla opačný směr. Velikost skutečné deformace byla asi 1,5 [mm]. Deformace simulovaná měla velikost asi 0,5 [mm] a byla opačného směru. Rozdíl činí 2 mm a tolerance rozměru v tomto místě je  $\pm 0,5$  mm. Obdobná je situace v oblasti hlavy pedálu. Zde je naopak skutečná deformace skoro třináctkrát nižší než hodnota deformace získaná simulací. Skutečná deformace dosáhla pouze 0,1 [mm], deformace vypočtená simulací 1,3 [mm]. Tolerance rozměru v tomto místě je  $\pm 0,2$  [mm]. Obdobná situace je i u materiálu Akulon K224-HG6, kde jsou rozdíly skutečné a vypočtené deformace v těchto partiích o něco menší. Skutečná deformace těla je asi dvanáctkrát větší a opět opačného směru. V partii hlavy je skutečná deformace devětkrát menší než vypočtená a směr je opačný jako v předchozím případě. Tyto dva rozměry vystihují značnou část geometrie dílu a jsou z nich patrné chybné výsledky simulace většinového rozsahu. Odpovídající deformace se projevila pouze v oblasti vlastního pedálu, tedy oblé stykové plochy s řidičovou nohou. Zde simulace popsala chování věrohodně u materiálu Ultramid B3WG10. U materiálu Akulon K224-HG6 již tomu tak nebylo a skutečná deformace byla dvojnásobkem deformace vypočtené.

Simulační softwary mají být nápomocny při návrhu a tvorbě vstřikovacích forem, mají šetřit čas a snižovat náklady na jejich výrobu. Jak se ale ukázalo v diplomové práci, spolehlivost simulace v daném případě je téměř rovna nule. Je nutno podotknout, že do simulace byly dosazovány reálné podmínky vstřikování, které nemá konstruktér formy v době, kdy je forma ve fázi vývoje, k dispozici, takže spolehlivost simulace v reálném nasazení je tak ještě nižší. Dá se předpokládat, že nespolehlivost v tomto případě byla způsobena složitým tvarem dílu a použitím materiálů plněnými skelnými vlákny, jejichž chování se matematicky velmi obtížně popisuje. Užití simulace v tomto případě způsobí pouze nárůst celkových nákladů na zhotovení vstřikovací formy.

## Použitá literatura

[1] *Učební texty katedry strojírenské technologie* [online]. [cit. 2012-20-01]. Dostupné z WWW: **[www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz)**

[2] *Učební texty katedry výrobních systémů* [online]. [cit. 2012-11-04]. Dostupné z WWW: **[www.kvs.tu.cz](http://www.kvs.tu.cz)**

[3] **Moldex3D/eXplorer - brána do světa 3D simulace vstřikování plastů. Článek 5.9.2010** [online]. [cit. 2012-10-03]. Dostupné z WWW: [www.plasticportal.eu](http://www.plasticportal.eu)

[4] **Materiálová specifikace materiálu ULTRAMID B3WG10.** [online]. [cit. 2012-02-05]. Dostupné z WWW: **[worldaccount.basf.com](http://worldaccount.basf.com)**

[5] **Materiálová specifikace materiálu AKULON K224-HG6.** [online]. [cit. 2012-03-05]. Dostupné z WWW: **[www.arcopolimeri.com](http://www.arcopolimeri.com)**

[6] **Technická specifikace vstřikolisů ENGEL.** [online]. [cit. 2012-10-05]. Dostupné z WWW: **<http://www.engelglobal.com>**

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2012

Podpis:

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2012

Signature